

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Simulace Technologie CONFORM

Simulation CONFORM Technology

Student:

Tomáš Brumar

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.

Ostrava 2012

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Brumar**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Simulace technologie CONFORM
Simulation CONFORM Technology**

Zásady pro vypracování:

- 1) Proveďte rešeršní analýzu současně využívaných simulačních programů ve tvářecích procesech.
- 2) Proveďte srovnání procesu CONFORM s procesem DRECE
- 3) Pomocí simulačního programu SimufactForming analyzujte proces protlačování pásu plechu z mosazi.
- 4) Analyzujte vliv počtu průchodů na dosaženou velikost intenzity deformace a intenzity napětí dle provedených matematických simulací.
- 5) Proveďte srovnání dosažených výsledků s experimenty.
- 6) Proveďte celkové vyhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) ALKORTA, J., ROMBOUTS, M., DEMESSEMAEKER, J., FROYEN, L., GIL SEVILLANO, J. On the impossibility of multi-pass equal-channel angular drawing. *Scripta Materialia*, 2002, 47, p. 13–18.
- 2) BEYERLEIN, I.J., TOME, C.N. Analytical modeling of material flow in equal channel angular extrusion (ECAE), *Materials Science Engineering*, 2004, A 380, p. 171–190.
- 3) CHUNG, S.W., SOMEKAWA, H., KINOSHITA, T., KIM, W., HIGASHI, K. The non-uniform behavior during ECAE process by 3-D FVM simulation, *Scripta Materialia*, 2004, 50, p. 1079–1083.
- 4) LI, S., BOURKE, M. A. M., BEYERLEIN, I.J., ALEXANDER, D.J., CLAUSEN, B. Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion, *Materials Science Engineering*, 2004b, A 382, p. 217–236.
- 5) LUIS PEREZ, C.J., LURI IRIGOYEN, R., GASTON-CHOA, D. Finite element modelling of an Al–Mn alloy by equal channel angular extrusion (ECAE). *Journal of Materials Processing Technology*, 2004. p. 153–154, 846–852.
- 6) WU, P., XIE, S., LI, H., YAN, M., HUANG, G., CHENG, L. Effect of extrusion wheel angular velocity on continuous extrusion forming of copper concave bus bar, *Trans. Nonferrous Soc.*, 2007, China 17, p. 280–286.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 14.5 2012


.....


Podpis studenta

Prohlášení o využití výsledků práce

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 14.5 2012

.....


Podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BRUMAR, T. *Simulace technologie CONFORM : bakalářská práce*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2012, 50 s. Vedoucí práce: Ruzs, S.

V bakalářské práci se zabývám matematickou 3D simulací při protlačování materiálu nástrojem na prototypovém zařízení DRECE za pomoci programu Simufact Forming. Dále pak vyhodnocením a srovnáním dosažený výsledků matematické simulace s experimenty.

V první části je provedena analýza současně využívaných programů pro matematickou simulaci. Dále pak přehled současných poznatků se zařízeními CONFORM a DRECE a jejich vzájemné srovnání. V další části byla provedena matematická simulace procesu DRECE v programu Simufact Forming a následná analýza vlivu počtu průchodů na velikost intenzity deformace a intenzity napětí. Byly také vyhodnoceny mechanické a metalurgické zkoušky. Na závěr byly srovnány výsledky z experimentálního a softwarového procesu a provedlo se celkové vyhodnocení.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BRUMAR, T. *Simulation CONFORM technology: bachelor thesis*. Ostrava: VŠB-Technical University Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2012, 50 p. Thesis supervisor: Ruzs, S.

In the bachelor thesis I deal with the mathematical simulation of 3D extrusion forming material in a tool for prototype device DRECE using the software Simufact Forming. Then by evaluating and comparing the achieved results mathematical simulation with experiments.

In the first part is an analysis of currently used programs for mathematical simulation. Then overview of current knowledge with devices CONFORM and DRECE and their mutual comparison. The next section was performed a mathematical simulation of the DRECE process in the program Simufact Forming and subsequent analysis of the influence the number of passes on magnitude intensity of deformation and stress intensity. There were also evaluated mechanical and metallurgical tests. In conclusion the results were compared to experimental and software process and to implement the overall evaluation.

Obsah bakalářské práce

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	6
SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ	9
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	11
ÚVOD.....	13
1. PŘEHLED V SOUČASNOSTI VYUŽÍVANÝCH PROGRAMŮ K MATEMATICKÉ SIMULACI VE TVÁŘENÍ	15
1.1 Form FEM.....	16
1.2 Qform.....	17
1.3 Simufact Forming	18
1.4 Deform – 3D	19
1.5 Pam - stamp.....	20
2. SROVNÁNÍ PROCESU CONFORM S PROCESEM DRECE	21
2.1 CONFORM.....	21
2.2 DCAP	24
2.3 DRECE.....	25
3. MATEMATICKÁ SIMULACE PROCESU PROTlačOVÁNÍ PÁSU PLECHU .	27
3.1 Materiál použitý při protlačování.....	27
3.2 Materiál Dievar	29
3.3 Matematická simulace.....	30
4. ANALÝZA VLIVU POČTU PRŮCHODŮ NA DOSAŽENOU VELIKOST INTENZITY DEFORMACE A NAPĚTÍ.....	33
4.1 Teoretický výpočet ekvivalentní deformace	33

4.2	Provedení a vyhodnocení matematické simulace nahrazující proces DRECE	34
4.3	Vyhodnocení simulace procesu DRECE v 1. průchodu nástrojem	37
5.	SROVNÁNÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ S EXPERIMENTY.....	39
5.1	Vyhodnocení experimentálního protlačování pásu plechu	39
5.2	Výsledky matematických simulací	44
5.3	Vyhodnocení dosažených výsledků	45
6.	ZÁVĚR.....	47
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	50

Seznam použitého značení

Značka	Název	Jednotka
A_{80}	Tažnost	[%]
ρ	Hustota	[kg*m ³]
C_p	Měrná tepelná kapacita	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
α	Teplovní součinitel roztažnosti	[K ⁻¹]
λ_t	Tepelná vodivost	[W*m ⁻¹ K ⁻¹]
λ_e	Konduktivita	[MS*m ⁻¹]
D	Průměr kola	[mm]
F	Síla	[N]
f	Součinitel tření	[-]
p_{max}	Tlak na nástroj	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
R_1	Vnitřní rádius nástroje	[mm]
R_2	Vnější rádius nástroje	[mm]
$T_{nástroj}$	Teplota nástroje	[°C]
T_{pol}	Teplota polotovaru	[°C]
T_o	Teplota okolí	[°C]
v	Rychlost hnacího kola	[rad* s ⁻¹]
\bar{x}	Aritmetický průměr hodnot	[mm]
$\bar{\varepsilon}$	Efektivní deformace	[-]
ε_i	Intenzita deformace	[-]

ε_{VM}	Ekvivalentní deformace	[-]
ψ	Úhel zakřivení oblouku (vnitřní úhel)	[°]
Φ	Úhel mezi kanály (vnější úhel)	[°]
$\bar{\sigma}$	Efektivní napětí	[MPa]
σ_i	Intenzita napětí	[MPa]
σ_m	Střední (hydrostatické) napětí	[MPa]
G	Číslo velikosti zrna	[-]
l	Průměrná délka zachyceného úseku	[mm]

Seznam použitých zkratk

CCSS/C2S2	Kontinuální uzavřené protlačování pásu plechu (Continuous Confined Strip Shearing)
DCAP	Kontinuální uzavřené protlačování pásu plechu (Continuous Confined Strip Shearing)
UFG	Ultra jemnozrnné materiály (Ultra Fine Grained)
CONFORM	Kontinuální protlačování nástrojem (Continuous Extrusion Forming)
DRECE	Protlačování plechu přes kanál pomocí válců (Dual Rolls Equal Channel Extrusion)
ECAP	Protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem (Equal Chanel Angular Pressing)
MKP	Metoda konečných prvků
FEM	Metoda konečných prvků (Finite Element Method)
FVM	Metoda konečných objemů (Finite Volume Method)
HV5	Tvrdost dle Vickerse (zatížení 5 kg)
SPD	Extrémní plastická deformace (Severe Plastic Deformation)

Byly splněny následující cíle práce:

- 1) Zpracování rešerše na téma nejpoužívanějších tvářecích softwarů ve tváření
- 2) Shrnutí základních poznatků o procesu CONFORM a DCAP pro lepší pochopení procesu DRECE
- 3) Vyhotovení matematických simulací procesu DRECE na pásu plechu z mosazi.
- 4) Analýza vlivu počtů průchodů na výslednou intenzitu deformace a intenzitu napětí.
- 5) Vyhodnocení dosažených deformačních stavů u matematické simulace a verifikace výsledků simulací s výsledky experimentálních prací
- 6) Závěrečné zhodnocení bakalářské práce a vytyčení hlavních cílů dalšího výzkumu.

Úvod

O vývoj technologií, které mají za cíl získání ultrajemnozrných a nanokrystalických materiálů je v posledních letech stále větší zájem, jak z důvodu využití stávajících, tak i pro zdokonalení nově vyvíjených materiálů. Zaměření je hlavně na tváření neželezných kovů a jejich slitin, u kterých se dosahuje srovnatelných v mnohých případech i lepších mechanických vlastností než mají oceli. Tyto materiály jsou také dobře recyklovatelné. Dochází také ke snižování výrobních nákladů. Tyto technologie jsou schopny dosáhnout u ultrajemnozrných materiálů (UFG) velikosti zrna v rozmezí 100 až 1000 nm a u nanokrystalických materiálů je velikost zrna v rozmezí 3 - 100nm.

Pro dosažení nanokrystalických struktur je potřeba vysokého stupně deformace dosahujícího 1000%. U těchto technologií lze dosáhnout extrémní plastické deformace, která dosahuje několika 100% až 100 000% a to na zařízeních technologií několikanásobné plastické deformace (SPD; Severe Plastic Deformation). Z těch nejznámějších jsou to ECAP (Equal Channel Angle Extrusion), CONFORM (Continuous Extrusion Forming) a DCAP (Dissimilar Channel Angular Pressing). Na tyto metody navazuje modifikované zařízení CONFORM neboli DRECE (Dual Rolls Equal Channel Extrusion) – 1. prototypové zařízení je určeno pro zjemňování struktury v pásu plechu, 2. prototypové zařízení je určeno pro zjemňování struktury v drátu. Tato zařízení jsou vyvíjena na pracovišti CPIT (Centrum pokročilých inovačních technologií) Katedry mechanické technologie, Fakulty strojní VŠB – TU Ostrava. Tyto technologie jsou uplatnitelné nejen v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu, kde se vyžadují lehké a mechanicky kvalitní materiály, ale i ve zdravotnictví a dalších odvětvích průmyslu. Nedílnou součástí vývoje a výroby je v posledních letech také využití matematických simulací za pomoci programů na principu metod konečných prvků MKP (FEM; Finite Element Method) nebo metod konečných objemů MKO (FVM ; Finite Volume Method). Tyto simulace jsou schopny ověřit správnost geometrie nástroje nebo analyzovat daný materiál v nadefinovaných tvářecích podmínkách a zamezit tak chybám při praktickém řešení problematiky. To výrazným způsobem zvyšuje efektivitu výroby a zároveň vede ke snížení výrobních nákladů. Touto cestou se průmysl teď a především budoucnu bude chtít ubírat. Touto bakalářskou prací navazuji na diplomovou práci Ing. Michala Jančí, a rozšiřuji její praktické výsledky o matematickou simulaci pásu plechu z mosazi. Zkušenosti získané při řešení mé bakalářské práce využiji při dalších experimentech a

simulacích v rámci diplomové práce. Zaměření bude na matematické simulace právě prováděných experimentů na pásech plechu z oceli, dále pak na experimentální protlačování a matematickou simulaci 2. prototypového zařízení DRECE pro protlačování drátů.

1. Přehled v současnosti využívaných programů k matematické simulaci ve tváření

Matematické simulace řeší velmi složité technologické operace, které jsou neřešitelné nebo složitě řešitelné analytickými metodami. Zkoumají chování tvářeného materiálu v reálném nebo zrychleném čase. Po provedení simulačních výpočtu lze graficky znázornit průběh celé operace. Pomocí simulace je možné důkladně prověřit různé varianty řešení. Umožňuje minimalizovat rizika chyb a dosáhnout tak zefektivnění celého procesu[1].

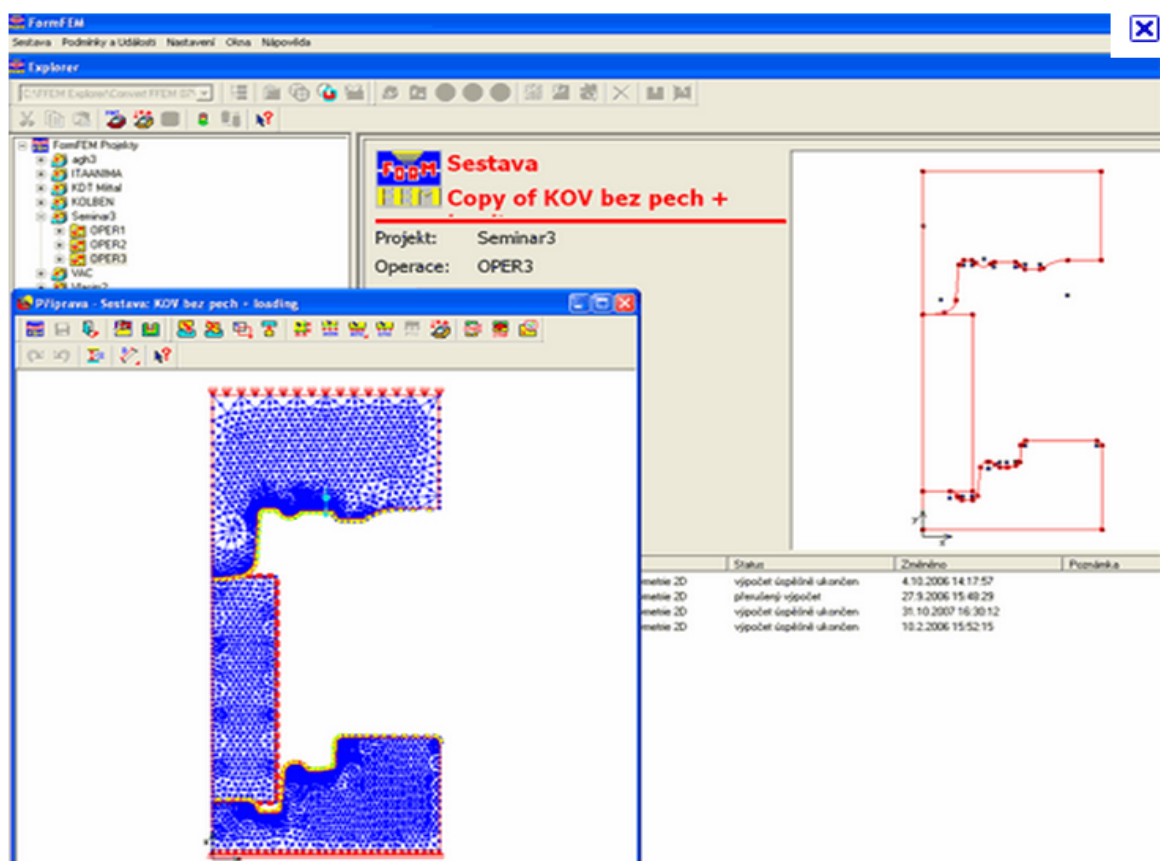
K matematické simulaci je možno využít různé druhy programů na principu FEM nebo FVM jako jsou například PATRAN, NASTRAN nebo ANSYS od společnosti MSC. Tyto programy však nemají nadefinované tvářecí prostředí a jeho příprava pro každou simulaci je časově náročná a vyžaduje pokročilé znalosti MKP což je zásadní např. pro ekonomické využití v průmyslu zejména u kusové výroby. [2]

K tomuto účelu jsou vyvinuty programy na stejném principu s nadefinovanými tvářecími podmínkami jako je Form FEM, QForm3D, Simufact Forming, Forge, DEFORM-3D nebo PAM-STAMP. Poslední jmenovaný je však zaměřen pouze pro lisování a hluboké tažení plechů a profilovaných součástí.

Následující část bude zaměřena na nejpoužívanější tvářecí programy, z nichž některé jsou také dostupné na VŠB-Technické univerzitě Ostrava na katedře mechanické technologie fakulty strojní (Form FEM, QForm3D, Simufact Forming).

1.1 Form FEM

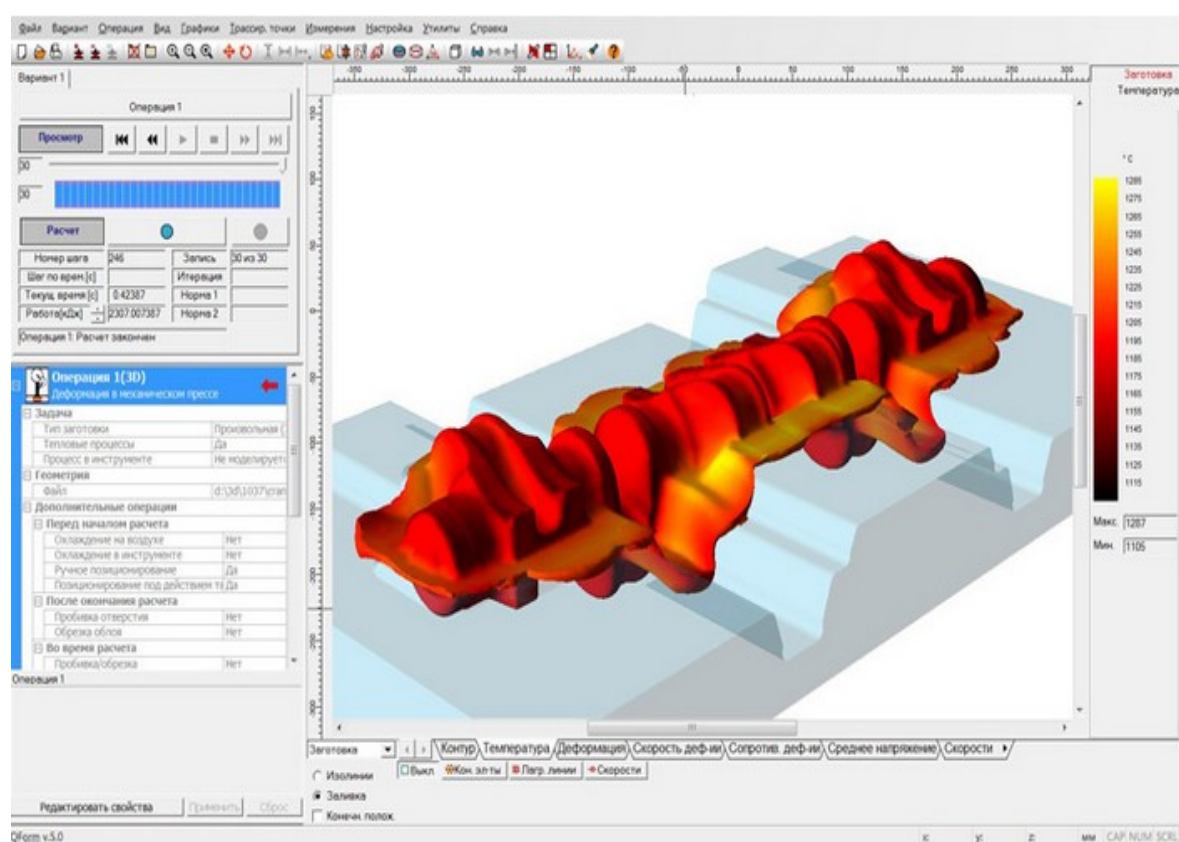
Program Form FEM od firmy ITA s. r. o. je software pracující metodou konečných prvků ve 2D prostoru s úplnou teplotní vazbou. Program vychází z tuho plastické formulace MKP a podmínky nestlačitelnosti, která je splněna metodou Lagrangeových multiplikátorů. Teplotní modul umožňuje určovat teplotu v tvářených tělesech i v nástrojích. Program používá adhezní, coulombovský a kombinovaný model tření.[3] Je možno volit ze tří typů simulačních sítí. Program nabízí také kreslicí editor a načítání geometrie ve formátu DFX. V průběhu procesu lze volit automatické předefinování sítě konečných prvků (remeshing). Obsahuje rozsáhlou databázi materiálů. Je schopen také nasimulovat samotné tepelné zpracování nebo jej zapojit do následujícího procesu.[1] Slouží pro simulování tvářecích procesu v oblasti objemového i plošného tváření a to za tepla i za studena.



Obr. 1 Prostředí programu FormFEM[9]

1.2 Qform

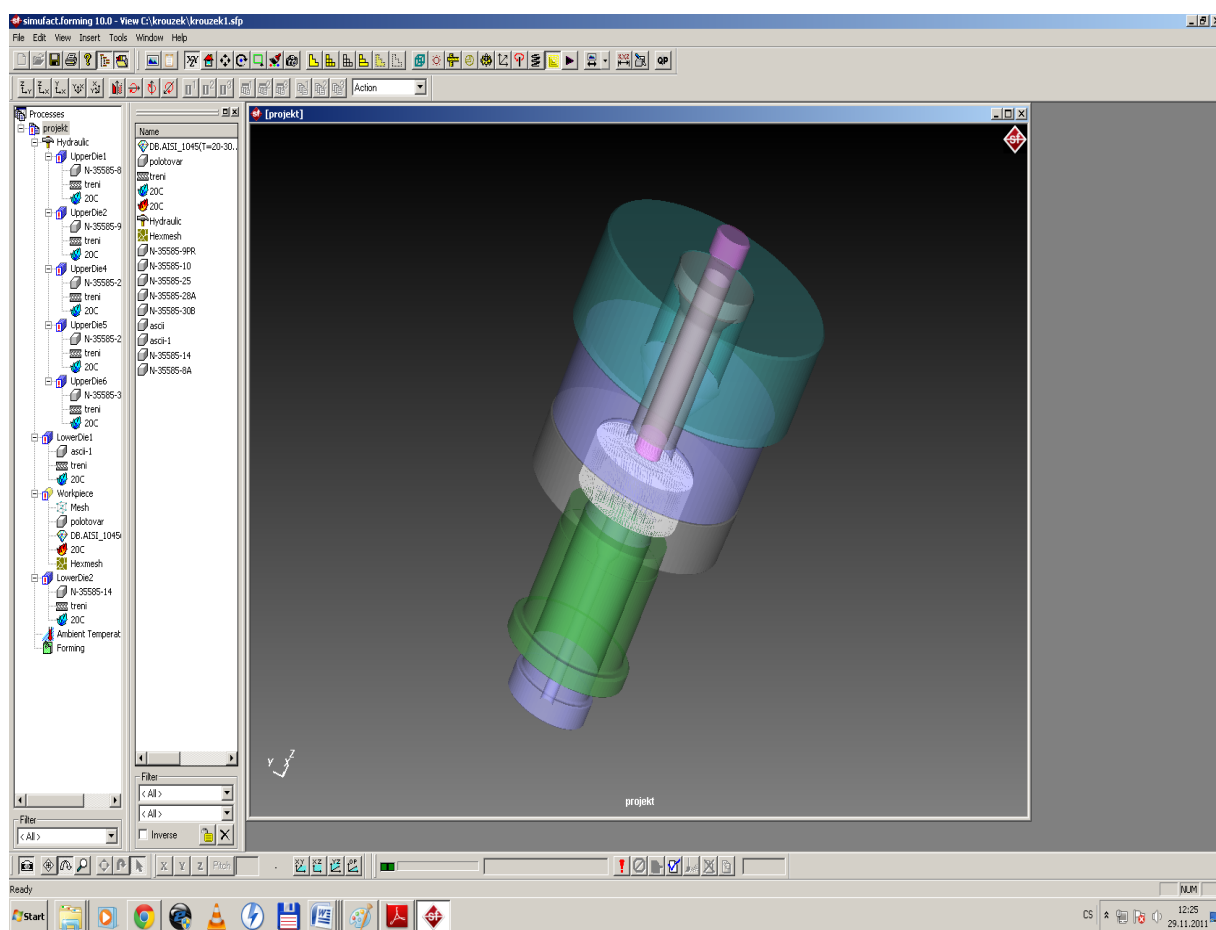
Software vyvinut firmou Quantor Ltd. jehož název tvoří zkratka Quantor Form. Je to soubor 2 téměř totožných programů, první z nich Qform2D je nástupcem simulačního programu FORM-2D pracující v dvojrozměrném rozhraní. Celý soubor je taktéž založen na algoritmech metody konečných prvků. U softwaru je nutné navolit pevné těleso jako počáteční geometrii, ale manipulace s programem je jinak totožná s 3D verzí. Užívání programu je velice snadné díky průvodci pro přípravu dat (Data Preparation Wizard) a minimu potřebných vložených dat. Model realizovaný v softwaru odpovídá reálnému procesu tváření. Program podporuje import IGES a STEP souborů, které zamezuje ztrátě přesnosti typické pro soubory ve formátu STL. Během animace tvářecího procesu software znázorňuje tok materiálu a vzniklé defekty. Během simulace je možnost kontrolovat teplotu v jakémkoliv místě simulované součásti. Výsledky jsou prostřednictvím 3D grafiky zobrazovány současně s postupem simulace, tím získáme okamžitou informaci a možnost napravit vzniklé chyby ještě před ukončením simulace.[4,5]



Obr. 2 Prostředí programu QForm[8]

1.3 Simufact Forming

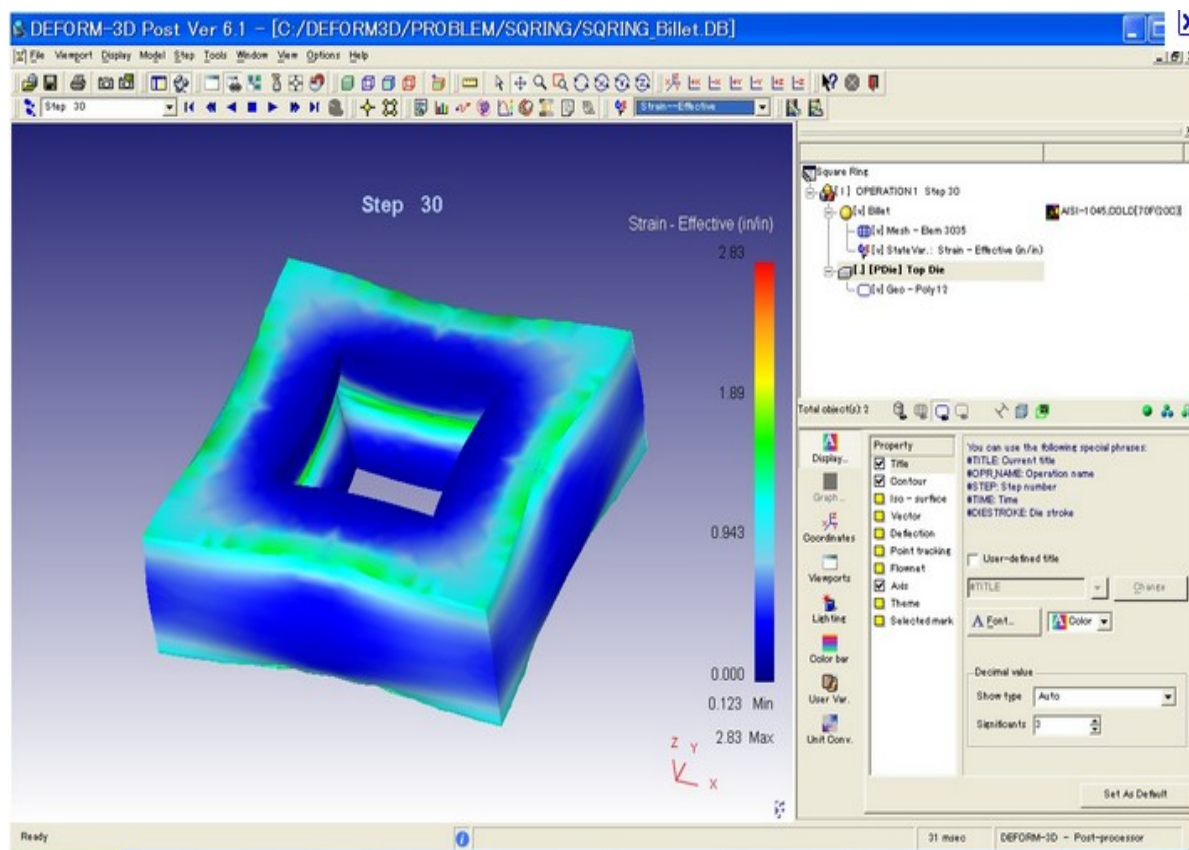
Je program vyvinut firmou Simufact (někdejší Femutec) a MSC. Software sloučením simulačních programů MSC.SuperForge a MSC.SuperForm do jednoho univerzálního softwaru umožňujícího simulaci všech druhů tvářecích procesů. Díky nové metodě výpočtů FVM (metoda konečných objemů), byl zkrácen čas výpočtu asi desetkrát oproti FEM. Obě metody jsou v softwaru dostupné. Podporuje všechny známé formáty CAD programů. Simufact Forming je integrované simulační prostředí pro optimalizaci všech tvářecích procesů: Zápustkové kování, protlačování, tažení, pěchování, ohýbání, stříhání, volné kování, kruhové válcování, válcování ploch, válcování profilů nebo válcování za studena, za tepla nebo polo-tepla, orbitální tváření, vytlačování, tváření plechů a dokáže i analýzu nástrojů, analýza materiálového toku nebo dielektrické analýzy. [6,7]



Obr. 3 Prostředí programu Simufact Forming

1.4 Deform – 3D

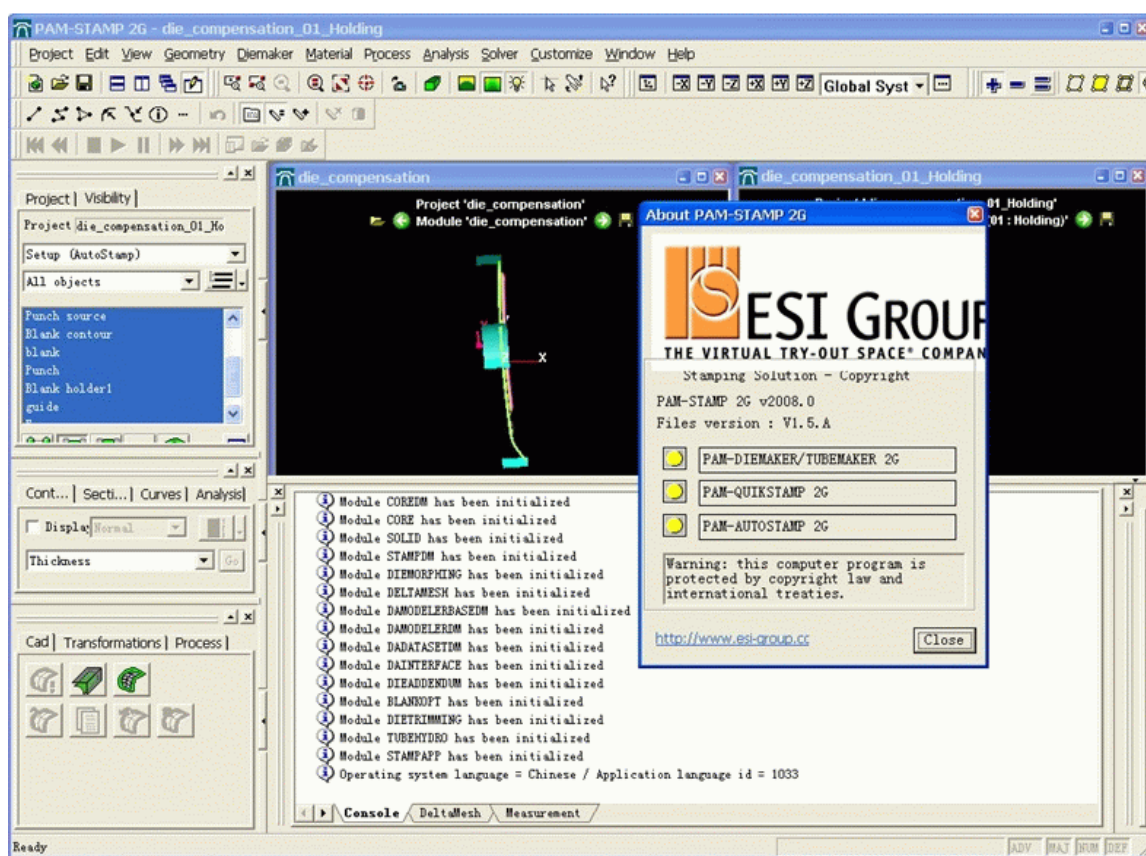
Je to výkonný software od firmy Scientific Forming Technologies Corporation, navržený pro 3D analýzu materiálových toků všech tvářecích procesů. Je schopen vytvářet modely elastické, tuho-plastické, termo elasto-plastické, termo visko-elastické, porézní a pevné. Program je schopen předvídat velké množství deformací a jejich tepelné pochody. Automatický generátor sítě (AMG; Automatic Mesh Generator) vytváří optimální velikost prvků na základě specifické technologie a to i při simulaci. Tím zajistí rozlišení různých prvků sestavy. Nabízí také možnost nadefinovat vlastní síť uživatelem. Proces stříhání a ořezávání může být také analyzován pomocí MKP. [10] Mezi typické aplikace tohoto programu patří kování, válcování, obrábění, protlačování ale také 2D a 3D kreslení. Modelovat lze také složité obráběcí operace.



Obr. 4 Prostředí programu DEFORM 3D

1.5 Pam - stamp

Programový modul z balíčku PAM od firmy ESI group specializovaný na simulaci plošného tváření technologiemi hlubokého tažení, ohýbání, lisování, flexi formingu, hydro formingu plechů i trubek. Pro řešení pohybové rovnice rovnováhy vnitřních a vnějších sil využívá explicitní formulaci MKP. Při řešení plně uvažuje deformační historii přístřihu plechu. Podmínka plasticity je založena na Hillově formulaci. Znalostí deformační historie umožňuje PAM-STAMP zahrnout do výpočtu lokální překročení hranice plastické deformace, překročení křivky mezních deformací nebo ztenčení. Výpočtová síť modelu je generována v grafickém pre-processoru společně s okrajovými a zatěžujícími podmínkami. Podporuje CAD, CAE, IGES a nově i CATIA modely. Díky svým přednostem je program hlavně využíván v automobilovém průmyslu kde se mohou výsledky importovat do jiného modulu PAM – CRASHa provádět na modelu nárazové zkoušky.[11,12]



Obr. 5 Prostředí programu PAM-STAMP[23]

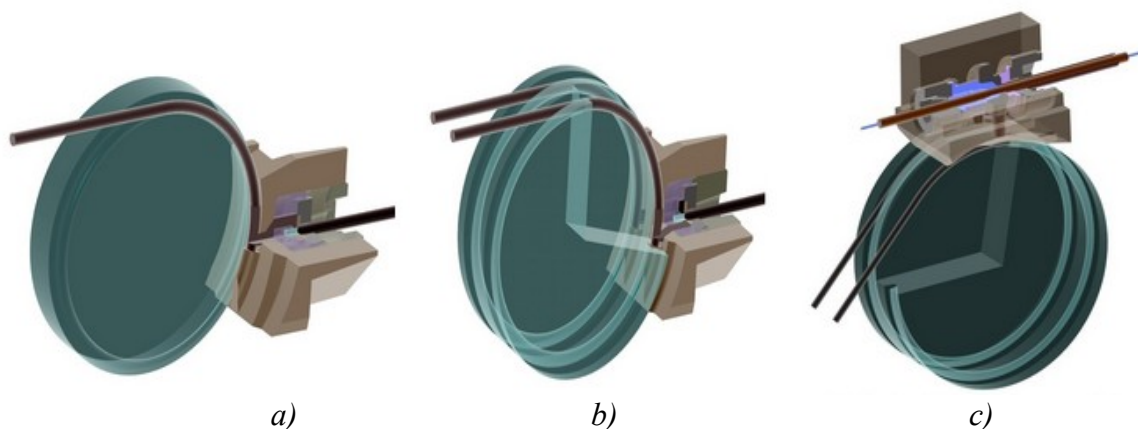
2. Srovnání procesu CONFORM s procesem DRECE

V současnosti je využíváno několika metod výroby UFG kovových materiálů, pracujících na principu vícenásobné plastické deformace. Většina z nich vychází z principů procesu ECAP vynalezeného v 80. letech 20. století v bývalém Sovětském svazu prof. R. Z. Valievem a prof. V. M. Segalem (USA). Zpracování UFG materiálu pomocí vícenásobné plastické deformace (SPD) se u procesu ECAP omezuje pouze na polotovary (hranol, tyč, profil), od počátků výzkumu však vznikly modifikace využívající kombinace procesu ECAP s válcováním, a technologickými inovacemi tvářecích nástrojů. Jako je například tváření různých průřezů polotovaru nebo tenkých plechů. Dále pak u těchto modifikací byly nahrazeny hydraulické lisy hydraulickými podávači s oběžnými koly, které mají upravený povrch a umožňují podávání materiálu pomocí tření a zároveň vyvíjí potřebný přítlak.

V této části práce se budu zabývat procesy CONFORM a DRECE s popisem jejich konstrukčních částí, jejich funkcemi, vlastnostmi a použitím v praxi. Pro lepší pochopení procesu DRECE, bude uveden popis také procesu DCAP (C2S2), ze kterého DRECE vychází.

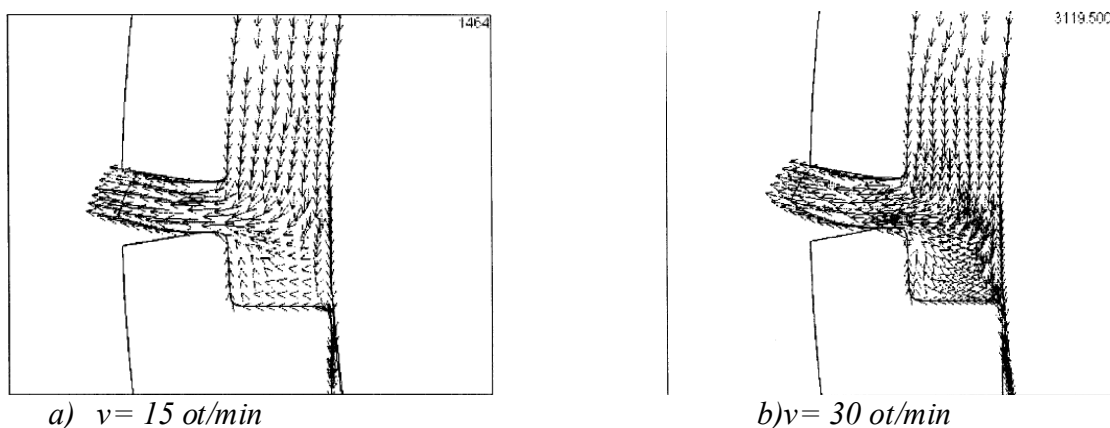
2.1 CONFORM (Continuous Extrusion Forming)

CONFORM kontinuální protlačování nástrojem za použití třecí síly mezi kruhovými řízenými koly a materiálem. Materiál, protlačovaný strojem kontinuálně může být kruhový nebo profilovaný, podle typu zařízení.[17]



Obr. 6 Druhy modifikací zařízení CONFORM[24] a) s radiální drážkou
b) s dvěma radiálními drážkami
c) s dvěma tangenciálními drážkami

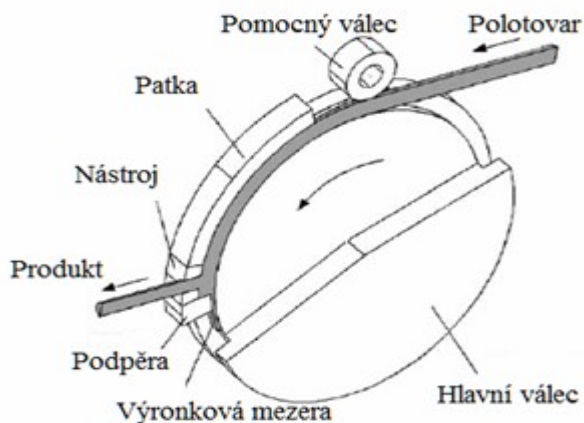
Experimentální a analytické studie probíhají nepřetržitě od roku 1980. Proces měl být původně využíván k plynulému vytlačování, ale na základě problémů s opotřebením nástroje nebyl nikdy použit. V současnosti se na něj navázalo a vzniklo několik modifikací nástroje tak i samotného stroje. Avšak procesní vlastnosti nebyly doposud dostatečně vyřešeny, s těch nejdůležitějších je to šířka (Flash) mezery, šířka a rychlost a průměr kola (podávacího válce).[18,19] Tyto mají největší vliv na materiálový tok.



Obr. 7 Příklad toku materiálu při rozdílných rychlostech kola (podávacího válce)[18]

Jedním z největších problémů u procesu je tzv. curling jev, je způsoben tokem materiálu do spodní části nástroje. Spodní materiálová část se rozdělí do dvou cest jak je patrné i z (obr. 7). První část z větší rychlostí materiálového toku proudí přes výronkovou drážku, zatímco druhá část směřuje přímo do nástrojové drážky. Studiemi se dokázalo, že na tento jev však nemá vliv rychlost podávacího válce nýbrž šířka a výška výronkové drážky. Zařízení se skládá z hlavního hnacího válce ten, může být opatřen drážkou dle druhu profilu materiálu nebo je plochý při protlačování plechů. U některých modifikací má také přítlačný válec např. při protlačování drátů. Nástroj je vyjmutelný s možností záměny za jiný profil což umožňuje výrobu rozličných profilů s velkou přesností a velmi příznivými mechanickými vlastnostmi. Dále může být opatřen předehřevem před operací i ohřevem během samotného protlačování. Tvářecí nástroj je upevněn v pouzdře a materiál pomocí podávací kladky je do něj tlačěn. Intenzivní deformací materiálu dochází k zjemnění zrna. Úhelsklonu kanálu je 100° až 140° . Proces je situován na více průchodů, přičemž s každým průchodem vede k menšímu stupni deformace, z čehož vyplývá provedení více průchodů pro zjemnění struktury než například u procesu ECAP.[15,20]

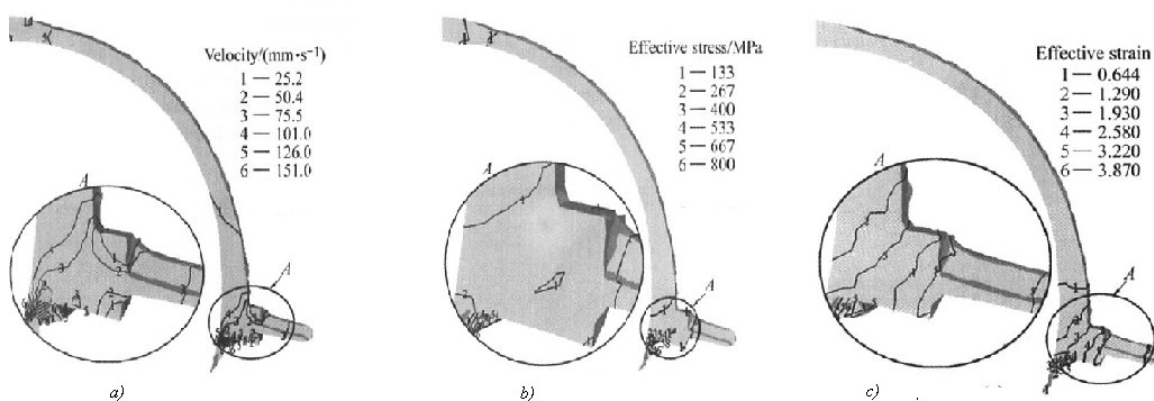
Proces poskytuje vynikající vlastnosti jako je vytlačování ultra-dlouhých bezešvých výrobků, při velmi nízkých nákladech na výrobu proto se začíná využívat například v automobilovém průmyslu při výrobě chladicích potrubí a komponentů. [19]



Obr. 8 Schéma procesu CONFORM [18]

Příklad matematické simulace procesu CONFORM

Simulace byla vytvořena v softwaru DEFORM – 3D. Jedná se o simulaci protlačování pásu z mědi. Na obrázcích je při zvyšování rychlosti hlavního válce, patrné zvýšení efektivní deformace $\bar{\varepsilon}$ a efektivní napětí $\bar{\sigma}$. [28]



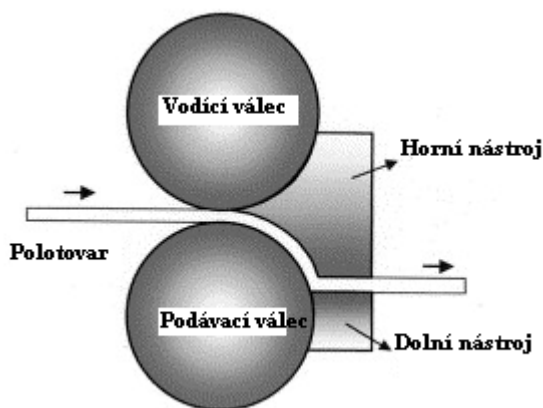
Obr. 9 Příklad matematické simulace CONFORM [28]

- a) Rychlost
- b) Efektivní napětí
- c) Efektivní deformace

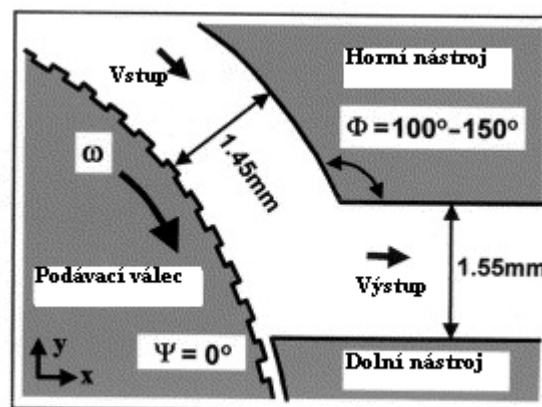
2.2 DCAP (Dissimilar channel angular pressing)

Dřívější označení CCSS/C2S2 proces (Continuous Confined Strip Shearing). Je metoda kontinuálního uzavřeného protlačování plechu velkých rozměrů. Metoda vycházející s principu ECAP (Equal Channel Angular Pressing), ten však nedokáže protlačit dlouhý a tenký plech, proto byla vyvinuta korejskými vědci tato metoda kombinující ECAP technologii a proces válcování.[21]

Materiál je podáván podávacím válcem, za pomoci přítlaku vodícího válce je veden kanálem, který z počáteční tloušťky kanálu (1,55 mm) se před tvářecí zónou mění na tloušťku (1,45 mm). V tvářecí zóně se vnitřní a vnější kanály protínají pod úhlem Φ , který může být 100° až 140° . Zde dochází k největší deformaci a plech vychází ven kanálem o tloušťce (1,55 mm).[13] Tato metoda umožňuje dosáhnout ultra jemných struktur velkých a tenkých plechů jako u ECAP technologie, což je příznivé pro průmysl využívající tenké velkoplošné materiály s velkými nároky na fyzikální a mechanické vlastnosti, jako je například automobilový nebo letecký průmysl.



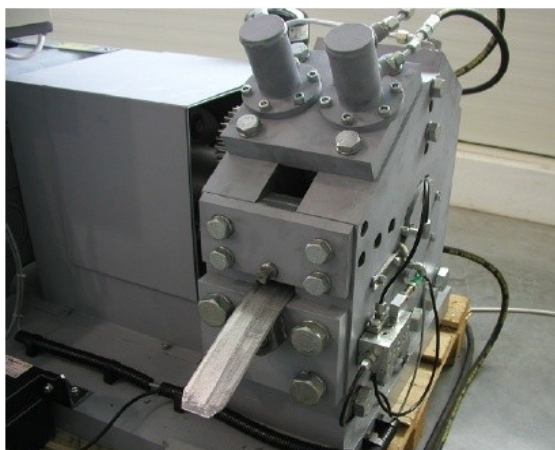
Obr. 10 Schéma procesu DCAP (C2S2)[25]



Obr. 11 Detail nástroje DCAP[25]

2.3 DRECE (Dual Rolling Equal Channel Extrusion)

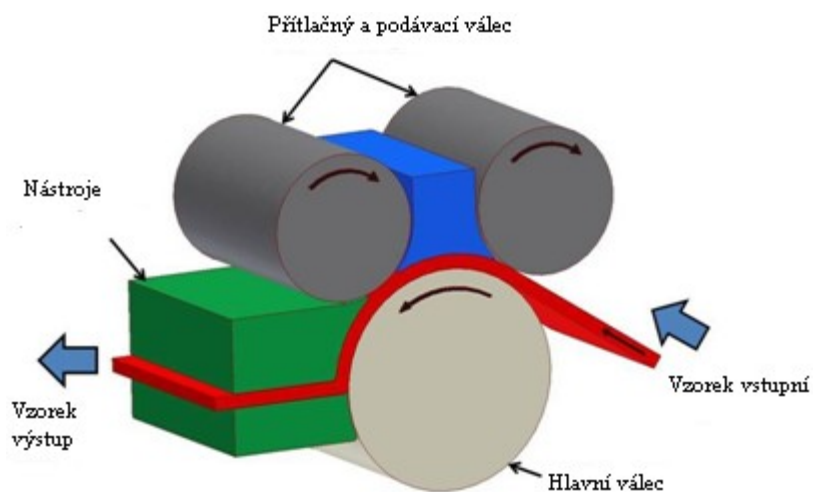
Dříve označováno jako modifikované zařízení CONFORM – DRECE nyní již pouze DRECE. Experimentální metoda vyvinuta na pracovišti CPIT, Fakultě strojní VŠB-TU Ostrava ve spolupráci s VÚHŽ Dobrá a.s. prototypové zařízení pracující na principech DCAP (C2S2) a CONFORM využívané ke zjemňování struktury v pásu plechu o rozměrech 59x2x1000 mm téměř s nulovým úběrem tloušťky.



Obr. 12 Čelní pohled na zařízení DRECE (výstup materiálu)

Zařízení se skládá ze dvou válců přitlačných, které mají možnost regulace přitlačné síly a jednoho podávacího válce, který v součinnosti s přitlačnými válci umožňuje protlačení pásu plechu tvářecím nástrojem. Pohon je zajištěn elektromotorem s převodovkou NORD přes lamelovou spojku. Tvářecí nástroj vyroben z oceli DIEVAR. Pás plechu je vložen do pracovního prostoru a je podávacím a přitlačnými válci veden do tvářecího nástroje. Pás plechu, z hlediska dosažení velikosti intenzity deformace, je několikanásobně protlačen tvářecím nástrojem. Při takto provedené vícenásobné plastické deformaci dochází k potřebnému zjemnění struktury.[15] V současnosti vědečtí pracovníci a studenti FS VŠB-TU snaží dosáhnout optimálních tvářecích parametrů zařízení DRECE (rychlost podávacího válce, přítlak, geometrie tvářecího nástroje, mazání) a také vyhodnotit vhodnost použitého materiálu pro dosažení potřebné UFG struktury. Dále se na pracovišti nachází zařízení nazvané také DRECE, fungující na stejném principu, sloužící pro protlačování drátů.

Toto zařízení je zatím ve zkušebním provozu a bude předmětem dalšího výzkumu. K optimalizaci technologických a tvářecích parametrů je využívána také matematická simulace daného procesu pomocí softwaru Simufact Forming (MKP). Jelikož se jedná o patentovou ochranu daného zařízení, není možno zveřejňovat podrobnější technické údaje[22].



Obr. 13 Schéma prototypového zařízení DRECE [16]

3. Matematická simulace procesu protlačování pásu plechu

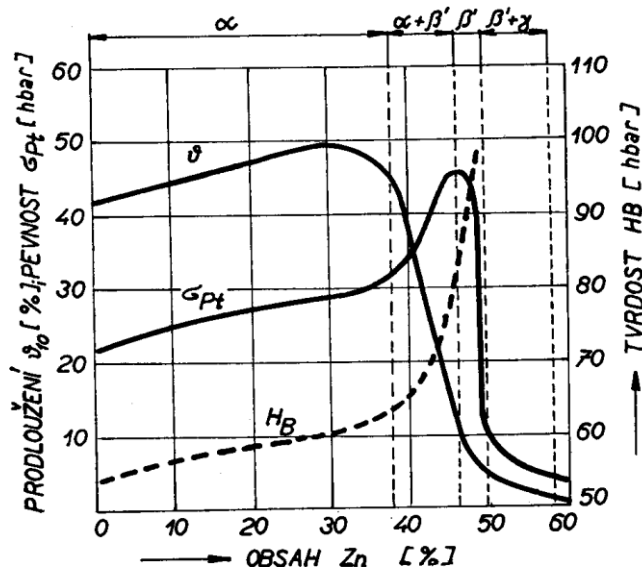
Matematická simulace je prováděna v softwaru Simufact Forming 10.0. Do něj jsou vkládány modely částí zařízení, nástrojů a vzorek, všechny modely jsou vytvořeny dle výkresové dokumentace v 3D CAD softwaru Autodesk Inventor. Dále byly k zařízení modelovány součásti sloužící jako opěrné či vodící lišty, tak aby vzorek nevybočoval z dráhy. Na skutečném zařízení tyto lišty nejsou, avšak jeho konstrukce je k tomuto uzpůsobena. Software nemá v nabídce procesů nekonvenční metody tváření, proto musela být zvolena optimální metoda, která nejvíce korespondovala s daným procesem DRECE.

3.1 Materiál použitý při protlačování

Mosazi ke tváření

Mosazi pro tváření obsahují 5 – 42 % zinku u tváření za studena se pohybuje obsah zinku na hranici rozpustnosti v mědi. Minimální obsah mědi v mosazi pro tváření je 63%. Cu-Zn mosazi mají širší rozpustnost zinku cca 35%.

Jednofázové slitiny- vlastnosti odvozené od Mědi, dobrá tvárnost, schopnost povrchových úprav. Zn 4- 42%. (Ms 96-85) tombaky jsou hlubokotažné mosazi CuZn30, nepříznivě působí i malý obsah Pb hlavně na tváření za tepla.



Obr. 14 Vliv zinku na mechanické vlastnosti mosazi

Dvoufázové slitiny- překročení rozpustnosti (β - tvrná za tepla, β' uspořádaná tvrdá a křehká). CuZn 37-42 (Ms 65-58)nejběžnější pro tváření za tepla, menší citlivost na obsah nečistot, nevýhoda náchylnost ke korozi za napětí zejména amoniaku ten způsobuje praskání během skladování bez zátěže. Přídavek 1-2 % Pb zlepšuje obrobiteľnosť kondenzátorové mosazi. Přídavkem Al (ev. Sn,Mn,As) k CuZn30 se dosáhne vyšší korozní odolnost. Niklové mosazi (cca 60 %Cu, 14-18 %Ni - pakfong, alpaka) mají vysokou odolnost proti korozi, pevnost, modul pružnosti.

Mosaz Cu65Zn35 komerční název dle JIS C2700 je určená pro tváření za studena i za tepla. Výchozí polotovary pro další využití jsou pásy plechu, trubky nebo dráty.

Tab. 3.1 Chemické složení mosazi Cu65Zn35 [26]

Chemické složení [hm. %]							
Cu	Al	Fe	Si	Pb	Sn	Mn	Zn
64,27	0,01	0,18	0,15	0,03	0,04	0,03	35,30

Tab. 3.2 Fyzikální vlastnosti mosazi Cu65Zn35 [26]

Fyzikální vlastnosti				
Hustota ρ [kg*m ³]	Měrná tepelná kapacita C_p [J*kg ⁻¹ *K ⁻¹]	Teplotní součinitel roztažnosti α [K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ_t [W*m ⁻¹ K ⁻¹]	Konduktivita λ_e [MS*m ⁻¹]
8430	387	19,0*10 ⁻⁶ (20 - 100°C)	121	14

Z knihovny softwaru byl zvolen ekvivalent materiálu k mosazi C2700. V knihovně dle JIS se nacházel nejbližší C2600 (T= 20 °C). Tento nejvíce korespondoval s jeho mechanickými, chemickými a fyzikálními vlastnostmi. S tímto ekvivalentem se dále pracovalo při matematické simulaci pásu plechu.

Tab. 3.3 Mechanické vlastnosti mosazi Cu65Zn35 [26]

Mechanické vlastnosti		
Název	Hodnoty	Jednotky
Modul pružnosti v tahu E	130000	MPa
Mez pevnosti R _m	230-240	MPa
Mez kluzu R _{p0,2}	75-80	MPa
Hustota	8650	[g/cm ³]
Tvrdost (HB10)	75-80	-

3.2 Materiál Dievar (materiál nástrojů)

Materiál Cr – MO středně legovaná ocel s vysokou houževnatostí a odolností proti opotřebení, určená zejména pro práci za tepla. Nejčastější použití je pro tlakové lití nebo pro výrobu nástrojů sloužících pro tváření kovů.

Z databáze programu Simufact Forming byl vybrán pro simulaci materiál SKD 61 dle japonské normy JIS G4404-83, který má nejbližší ekvivalent k materiálu Dievar. Má podobné chemické složení a mechanické vlastnosti. Je to nástrojová legovaná ocel pro práci za tepla. [16]

Tab. 3.4 Chemické složení materiálu SKD 61 [26]

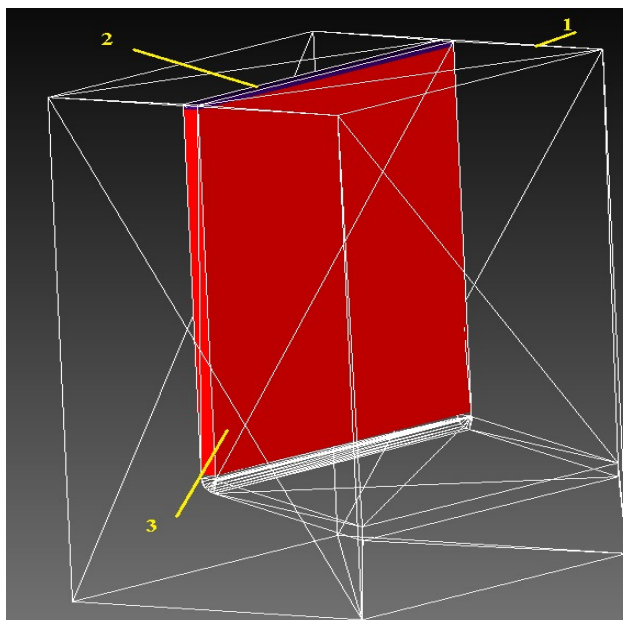
Prvek	C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	V
[%]	0,37–0,43	4,8–5,5	0,3 – 0,5	1,2–1,5	≤0,03	≤0,03	0,9–1,2	0,9–1,1

Tab. 3.5 Fyzikální vlastnosti materiálu SKD 61 [26]

NÁZEV VLASTNOSTÍ	JEDNOTKY	HODNOTY
Mez pevnosti R _m	[MPa]	791
Tvrdost	[HB]	235

3.3 Matematická simulace

V první části matematické simulace jsem provedl ověření vlivu geometrie nástroje na dosaženou velikost intenzity deformace. Úhly nástroje DRECE jsou při simulaci přizpůsobené procesu ECAP. Tyto výsledky mi poslouží pro lepší pochopení matematické simulace celého tvářecího procesu. Důvodem provedení takovéto matematické simulace (náhrada procesu DRECE procesem ECAP) byly vyskytující se potíže při výpočtu v 1. i 2. průchodu nástrojem DRECE. Docházelo k matematickým a softwarovým chybám vlivem deformace sítě a ve vlastním iteračním procesu. Strom procesu obsahuje tři části průtlačník, nástroj a vzorek. Simulace proběhla jako dopředné protlačování (Forward Extrusion) stejně jako ECAP. Rychlost protlačování byla zvolena 1 mm/sec, síťování Overallhex, typ elementu Hexahedral při velikosti elementu 0.4 mm. Řešitel (Solver) byl zvolen Interactive Sparse. Takto vytvořenou sestavou viz.(Obr. 14) jsem vzorek protlačil a zkoumal velikost intenzity deformace a napětí v závislosti na počtu průchodů. Při čemž průchody byly provedeny čtyři.



Obr. 15 Sestava ověřovací metody DRECE – ECAP
(1 – nástroj, 2 – průtlačník, 3 – vzorek)

Tab. 3.6 Zadané parametry ve stromu procesu DRECE - ECAP

	Název (softwarové označení)	hodnota	jednotky
$T_{nástr}$	Teplota nástrojů (Die Temperature)	20	[°C]
T_{pol}	Teplota polotovaru (Workpiece Temp.)	20	[°C]
T_{ok}	Teplota okolí (Ambiente Temp.)	20	[°C]
$f_{nást}$	Koeficient tření nástrojů (Friction)	0,05	[-]
V	Rychlost protlačování	1	[mm/sec]

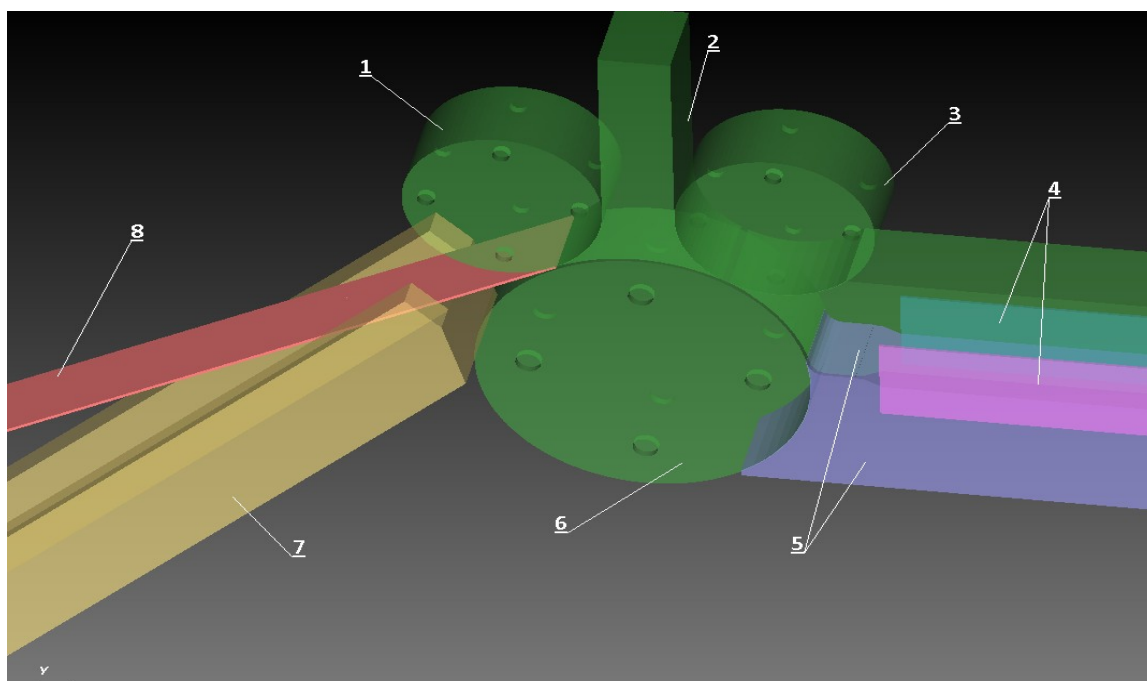
Ve druhé části matematické simulace jsem se zaměřil na simulaci reálného procesu. Tento proces však vyžaduje pokročilé nastavení všech parametrů procesu, což bude předmětem dalších prací. Proto v reálné simulaci bude předveden pouze první průchod materiálu nástrojem, který má zachované nástrojové úhly, ale větší rádius R2 pro průchod materiálu. Velikost R2 byla zvolena jako nejmenší možná pro základní (Basic) nastavení celého procesu. Při snižování velikosti zaoblení až na reálnou velikost docházelo k matematickým a grafickým chybám v softwaru z čehož vyplývala nutnost pokročilejšího nastavení parametrů daného procesu.

Pro simulaci 1. průchodů nástrojem DRECE byl vytvořen strom procesu s danými parametry materiálu (viz tab. 3.1, 3.2, 3.3), nástrojů (viz tabulka 3.4, 3.5). Software neobsahuje funkci kombinovaného podávání materiálu válci s následným protlačováním. Proto musel být pro simulaci zvoleno optimální zadání z databáze programu Simufact Forming . Po mnoha experimentálních simulacích byla zvolena metoda Forward Extrusion a v dalších částech matematické simulace se počítalo s okrajovými podmínkami dané metody. Typ řešitele (Solver) byl zvolen Iterative Sparse, při síťování 5 mm (Mesh). Jelikož se jedná o plech mosazi tak síť byla zvolena Sheetmesh, typ elementu Hexahedral. Minimální počet elementu nad sebou 3. Další parametry vkládány do stromu procesu viz tabulka 3.6. Pro definování tlaku válců a jejich vzájemného dotyku s plechem sloužila funkce Boundary Wizard. Tření mezi válci a materiálem nástrojů bylo zvoleno dle Coulomba.

Tyto nastavení, jako například velikost a typ elementu, nebudou u reálného nástroje možné znovu síťovat (remeshovat) z důvodu dosažení extrémních deformací (nelze provést Remeshing). Pro takovéto deformace se lépe hodí síť smesh s Tetrahedral elementem.

Tab. 3.7 Zadané parametry ve stromu procesu DRECE

	Název (softwarové označení)	hodnota	jednotky
$T_{nástr}$	Teplota nástrojů (Die Temperature)	20	[°C]
T_{pol}	Teplota polotovaru (Workpiece Temp.)	20	[°C]
T_{ok}	Teplota okolí (Ambiente Temp.)	20	[°C]
$f_{nást}$	Koeficient tření v zoně plasticity (Friction)	0,1	[-]
f_{val}	Koeficient tření mezi materiálem a válci (Friction)	3	[-]
v	Rychlost (hlavního) hlavního válce	0,01745	[rad/s]
D	Průměr hlavního válce	198	[mm]
p_{max}	Tlak přitlačného válce (Apply stress)	140	[MPa]
F_{vo}	Přítlačná síla vodícího válce (Apply force)	0,08	[kN]



Obr. 16 Sestava zařízení DRECE v softwaru Simufact Forming (1. vodící válec, 2. klín, 3. Přitlačný válec, 4. Vodící lišty, 5. horní a spodní nástroj, 6. Hlavní válec, 7. Podpěra, 8. Vzorek)

4. Analýza vlivu počtu průchodů na dosaženou velikost intenzity deformace a napětí

Tato část bude zaměřená na velikosti intenzity deformací a napětí dosažených jak teoretickými výpočty tak po matematických simulacích. Podle velikosti intenzity deformace lze posoudit, o jakou deformaci se jedná s hlediska mechanismů zjemňování zrna. Tyto deformace lze rozdělit do čtyř částí:[29]

- Malé deformace ($\varepsilon_{VM} < 2$)
- Malé až střední deformace ($\varepsilon_{VM} = 2 - 4$)
- Střední až vysoké deformace ($\varepsilon_{VM} = 4 - 6$)
- Extrémní deformace – SPD ($\varepsilon_{VM} > 6$)

4.1 Teoretický výpočet ekvivalentní deformace

Teoretický výpočet byl proveden pomocí vztahu dle Y. Iwahashiho pro metodu ECAP. Rovnice používaná při nenulovém úhlu Ψ . [30]

$$\varepsilon_{VM} = \frac{n}{\sqrt{3}} * \left[2 * \cot g \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi * \frac{1}{\sin \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right)} \right]$$

- n počet průchodů
- φ úhel mezi kanály (vnější úhel)
- Ψ úhel zakřivení oblouku (vnitřní úhel)

Dle použitého vztahu by teoreticky ekvivalentní intenzita deformací měla dosahovat hodnot uvedených v tabulce 4.8.

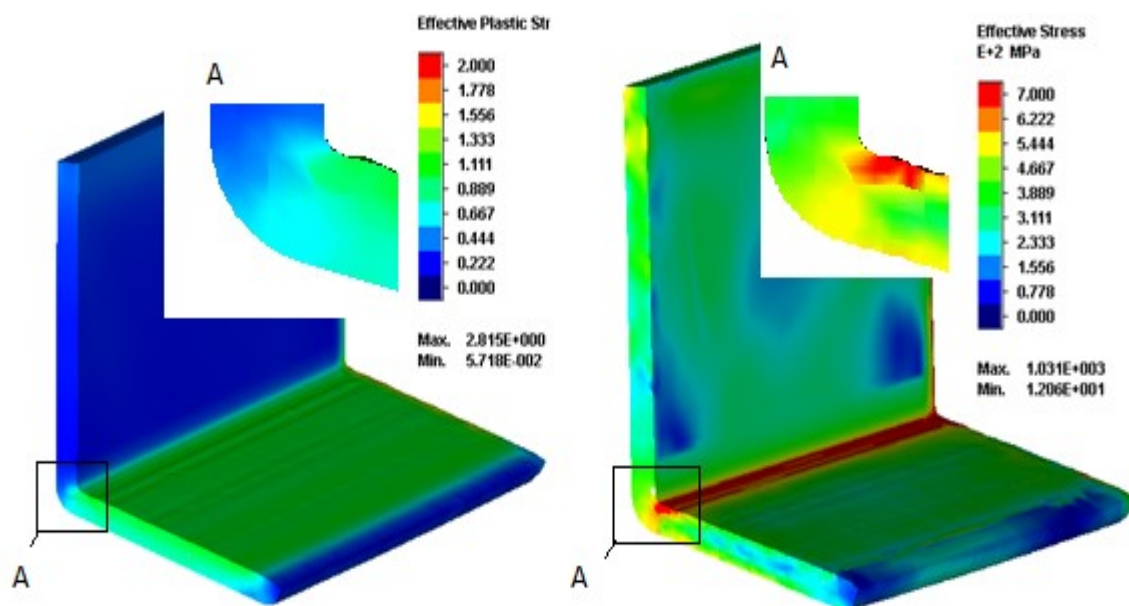
Tab. 4.8 Teoretická ekvivalentní deformace

Počet průchodů n	Ekvivalentní deformace ε_{VM}
První	0,746
Druhý	1,493
Třetí	2,240
Čtvrtý	2,298
Pátý	3,373
Šestý	4,480
Sedmý	5,227
Osmý	5,973

Z výpočtu vyplývá, že pro dosažení homogenní UFG struktury je zapotřebí u nástroje s takto nadefinovanými úhly Ψ a φ dosáhnout alespoň 8. průchodu. Z důvodu patentové ochrany prototypového zařízení není možné zveřejnit výše zmíněné úhly použité pro výpočet.

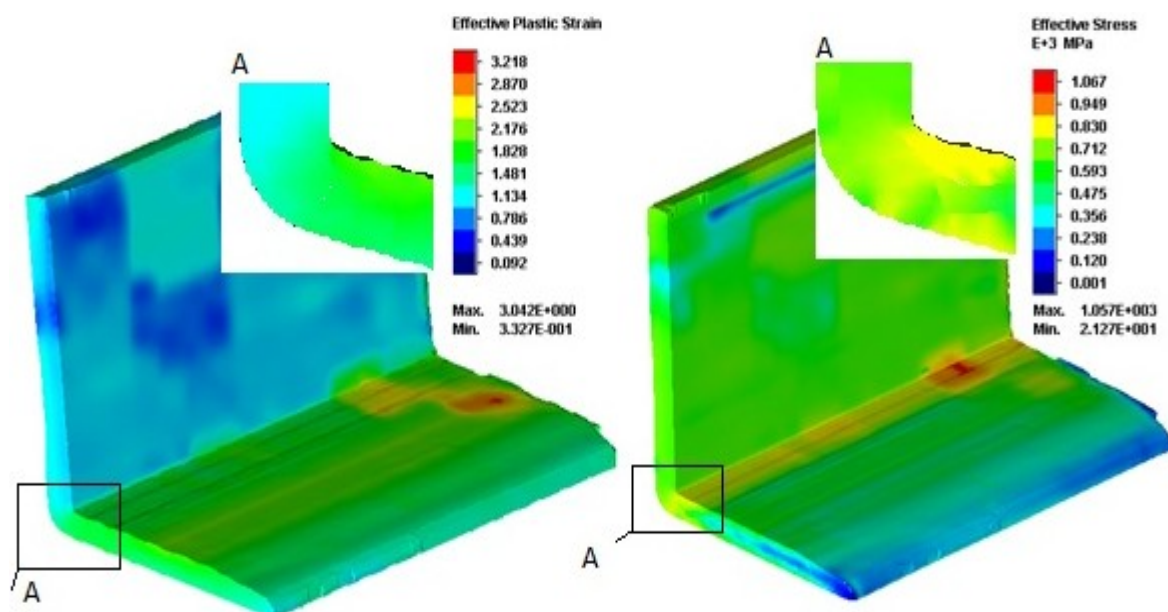
4.2 Provedení a vyhodnocení matematické simulace nahrazující proces DRECE

Při ověřování úhlů nástroje se jednalo o úhel, který svírají oba kanály Φ a o úhel zaoblení spodního nástroje Ψ . Tyto hodnoty se budou různit u reálného procesu, jelikož u DRECE je přísuv materiálu zprostředkován pomocí tření a při zvýšení odporu vůči posuvu se proces mírně zpomalí. U daného procesu se při zvýšení odporu vůči posuvu zvýší výsledná intenzita napětí, protože se jedná o dopředné protlačování. Proto bylo do procesu zadáno co nejmenší tření dle Coulomba, aby se výsledky zaměřili pouze na tvar a úhel nástroje. Všechny hodnoty byly vyhodnocovány z místa, kde materiál prochází nástrojem v 50 % průběhu protlačovacího procesu.



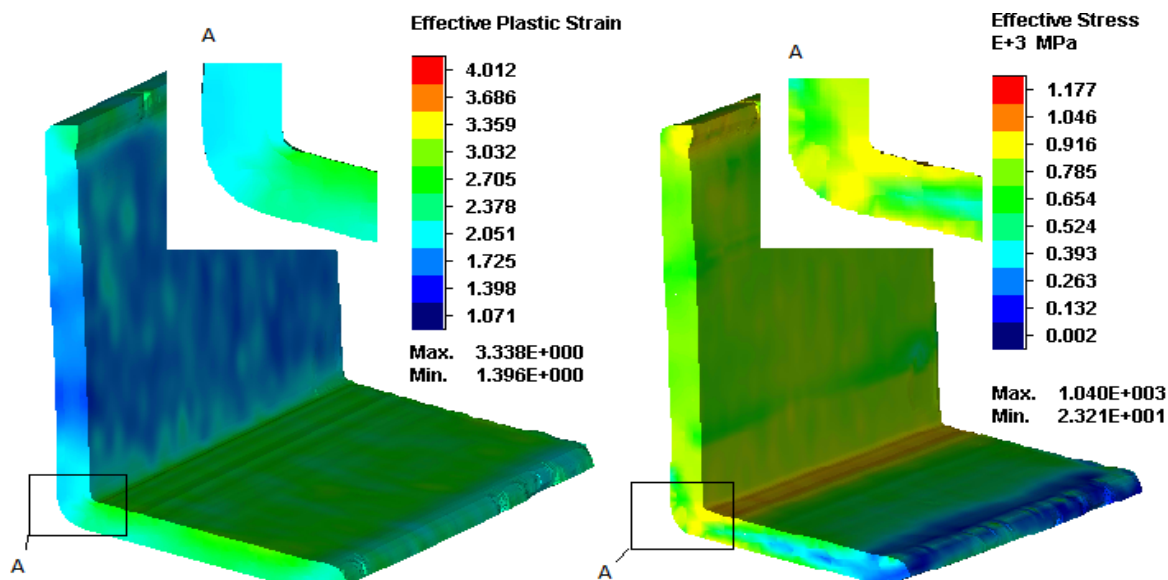
Obr. 17 Intenzita napětí a intenzita deformace po 1. průchodu

Dosažené hodnoty po 1. průchodu jsou $\varepsilon_i = 0,667$; $\sigma_i = 544$ MPa



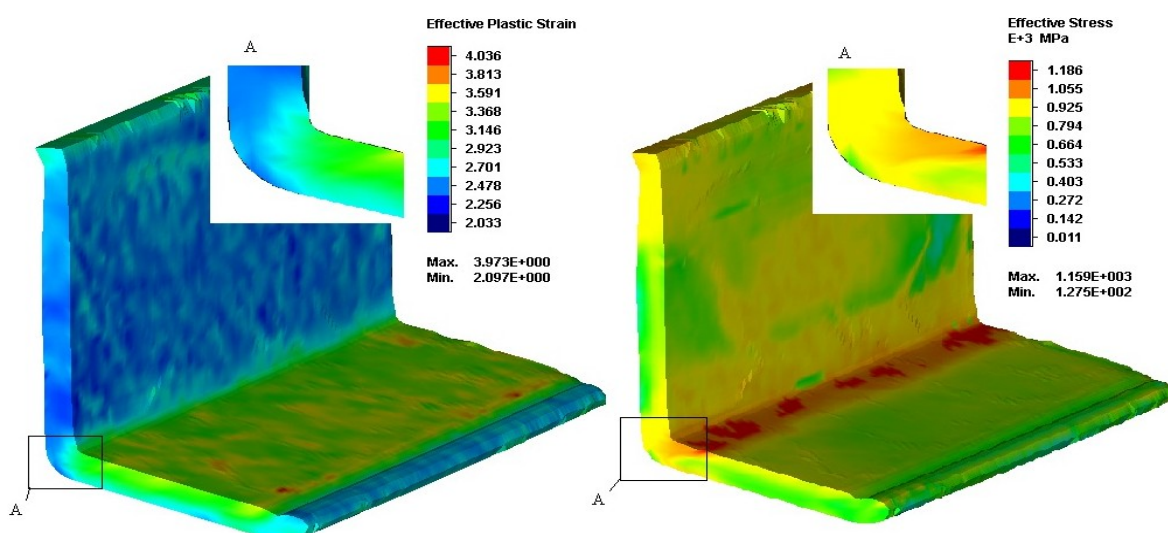
Obr. 18 Intenzita napětí a intenzita deformace po 2. průchodu

Dosažené hodnoty po 2. průchodu jsou $\varepsilon_i = 1,481$; $\sigma_i = 830$ MPa



Obr. 19 Intenzita napětí a intenzita deformace po 3. průchodu

Dosažené hodnoty po 3. průchodu jsou $\varepsilon_i = 2,378$; $\sigma_i = 916$ MPa



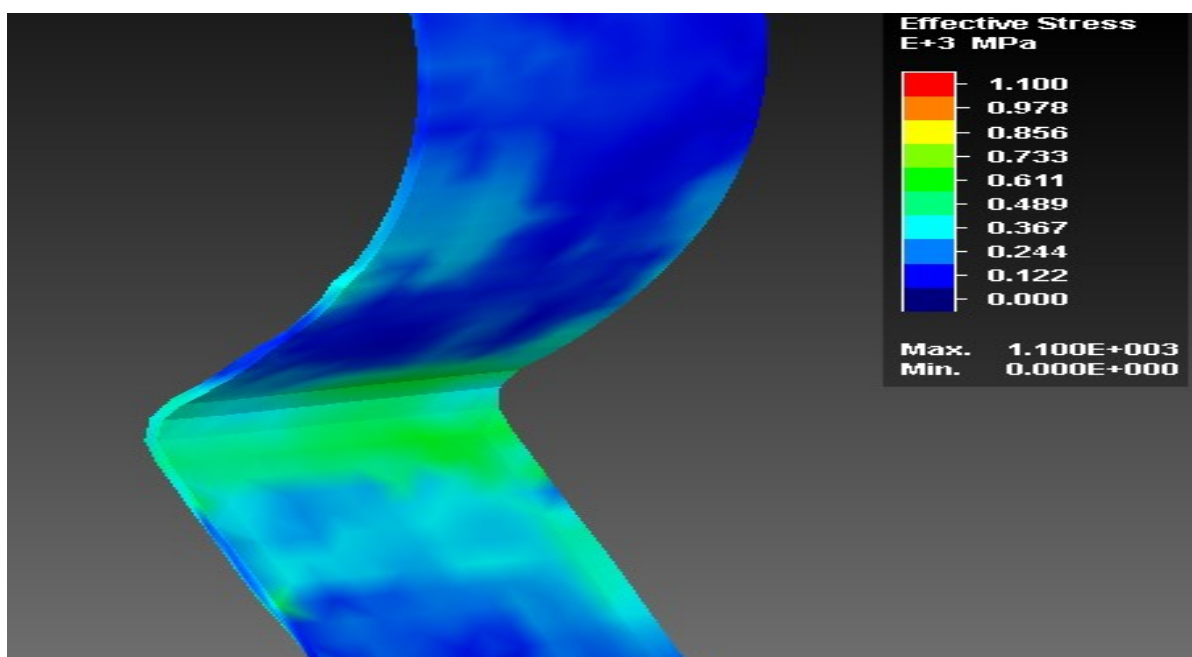
Obr. 20 Intenzita napětí a intenzita deformace po 4. průchodu

Dosažené hodnoty po 4. průchodu jsou $\varepsilon_i = 2,923$; $\sigma_i = 925$ MPa

Dosažené hodnoty matematické simulace nahrazující proces DRECE se u hodnot intenzity deformace ε_i téměř shodují s vypočtenými experimentálními hodnotami ekvivalentní intenzity deformace ε_{VM} . U 4. průchodu již hodnoty výrazně nenarůstají. Celkově se hodnoty pohybují v předpokládaných mezích. Je možno konstatovat, že simulace proběhly správně a lze s nimi porovnávat simulace vlastního procesu DRECE a následně i experimentální výsledky. Vyšší červené hodnoty viditelné na obrázku jsou zapříčiněny volbou typu elementu jeho deformací a následnými matematickými chybami softwaru. Při pokročilem nastavení se již tyto chyby budou vyskytovat jen zřídka.

4.3 Vyhodnocení simulace procesu DRECE v 1. průchodu nástrojem

Na obr. 21 – 24 jsou znázorněny vlastní simulace procesu DRECE. Hodnoty intenzity napětí a intenzity deformace jsou analyzovány v podélném i v příčném řezu. Z hlediska vlastní proveditelnosti simulace byl nepatrně zvětšen vnější poloměr zaoblení R2. Výsledky zpevnění dosažené simulací po 1. průchodu odpovídají reálným křivkám přetvárného odporu, uvedeným v literatuře [31]. Indikace intenzity napětí a deformace před vstupem do nástroje je způsobena přtlakem podávacího a vodícího válce v kombinaci s ohybem vznikajícím při přísuvu po hlavním válci.

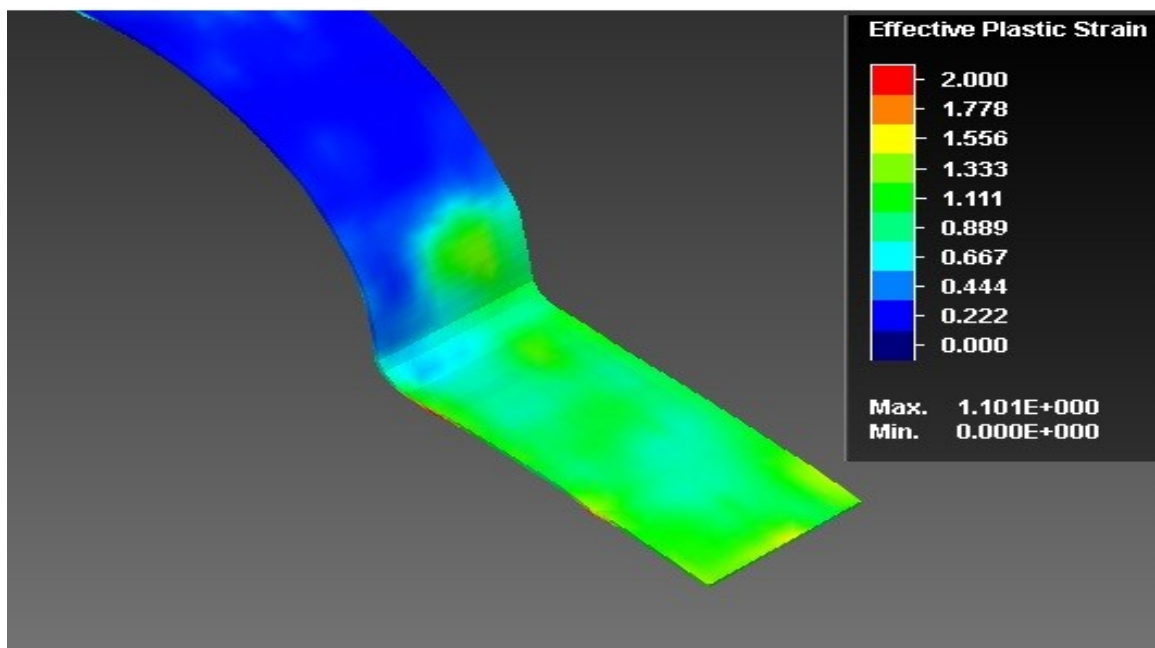


Obr. 21 Intenzita napětí na zařízení DRECE po 1. průchodu

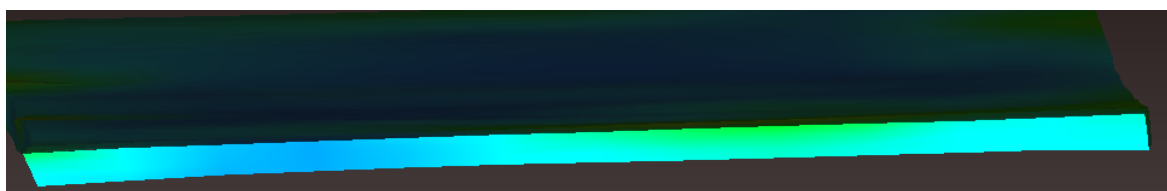


Obr. 22 Intenzita napětí při 1. průchodu nástrojem - příčný řez

Maximální dosažená intenzita napětí $\sigma_i = 367$ MPa. Tato hodnota je v rozmezí hodnot zpevnění daných křivkami zpevnění mosazi, uvedených v materiálových normách.



Obr. 23 Intenzita deformace na zařízení DRECE po 1. Průchodu



Obr. 24 Intenzita deformace při 1. průchodu nástrojem

Maximální dosažená intenzita deformace $\varepsilon_i = 0.677$ což při daném zaoblení ψ lze považovat za optimální hodnotu po prvním průchodu.

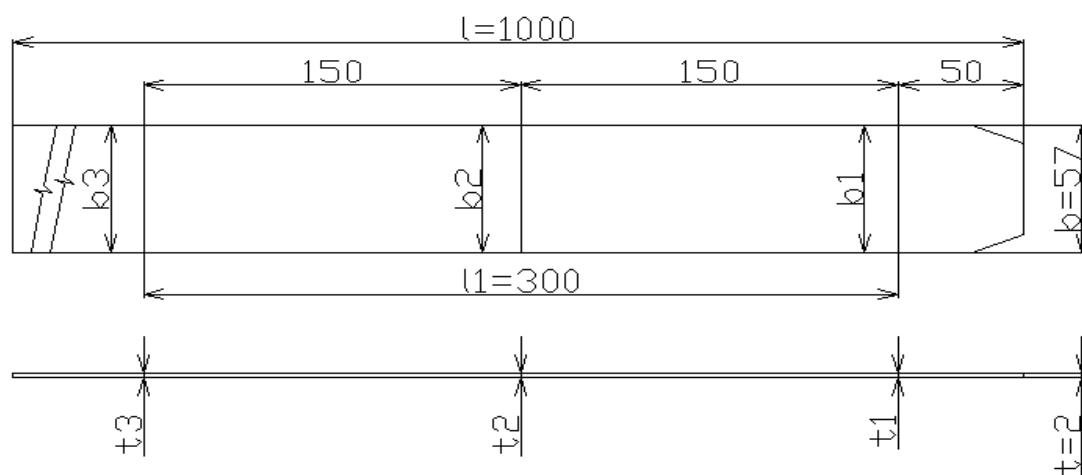
Z výsledků simulace vyplývá nutnost provedení ověřovacích simulací 1. průchodů, jelikož se projevil účinek velikosti elementu sítě, volby kroku a okrajových podmínek, které mají velký vliv na výskyt chyb při simulaci a enormně prodlužují čas výpočtu. Daná problematika je průběžně konzultována s technickou podporou firmy EC Engineering. Dosažená velikost intenzity deformace je velmi příznivá, ale musí být verifikována.

5. Srovnání dosažených výsledků s experimenty

V této části bakalářské práce budou porovnány výsledky matematické simulace a experimentálního protlačování. V první části budou zveřejněny výsledky experimentálních prací, které byly prezentovány na katedře mechanické technologie FS, VŠB – TU Ostrava. V práci jsem se zaměřil pouze na mosaz bez tepelného zpracování, jelikož z experimentů vyplynulo, že u mosazi se významně neprojevil vliv tepelné zpracování na změnu hodnot mechanických vlastností.

5.1 Vyhodnocení experimentálního protlačování pásu plechu

V první etapě experimentálních prací byly vyhodnoceny změny rozměrů polotovaru při protlačování (délka – l , šířka – b , tloušťka – t). U mosazi se pás plechu zkracuje o hodnotu cca 18 mm a rozšiřuje o zhruba 0,2 mm. Přítlak byl zvyšován na základě zvýšení tuhosti materiálu po čtvrtém průchodu a nutnosti zvýšit třecí sílu pro plynulost procesu. Z tabulky je patrné, že na úkor zvětšení tloušťky t a šířky b , se celková délka zkracovala. Změny však byly v řádech několika milimetrů. Tyto změny rozměrů byly zaznamenány i v matematické simulaci.



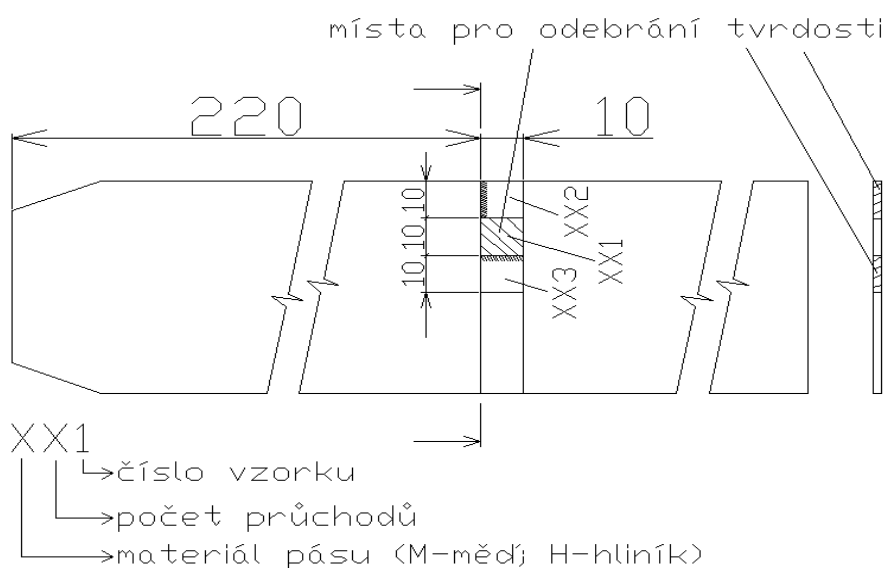
Obr. 25 Schéma měření pásu plechu při experimentu

Tab. 5.9 Naměřené rozměry pásu plechu z mosazi bez tepelného zpracování [27]

Průchod	Otočení [°]	l x š x t [mm]							Mazání	Tlak [bar]	Přítlak [Nm]
		l_1	b_1	b_2	b_3	t_1	t_2	t_3			
Výchozí		300	58,34	58,16	58,01	1,79	1,75	1,75			
1	0	297	58,54	58,35	58,21	1,71	1,81	1,81	ano	110	40
2	180	293	58,69	58,48	58,41	1,81	1,82	1,87	ano	110	40
3	0	289	58,82	58,60	58,59	1,83	1,82	1,89	ano	110	40
4	180	285	58,89	58,84	58,70	1,87	1,85	1,86	ano	130	40
5	0	283	59,22	59,03	58,90	1,85	1,85	1,85	ano	130	40
6	180	282	59,38	59,14	59,11	1,85	1,82	1,83	ano	130	40

Mechanické vlastnosti

Pro zkoumání tvrdosti (HV5) dle ČSN EN ISO 6507-1 jsou vzorky odebírány ze tří částí plechu. A to XX-1 z povrchu vzorku, XX-2 z vnitřní strany vzorku a XX-3 vnější strana vzorku (podélný řez).



Obr. 26 Schéma plechu s ukázkou míst odběru vzorku [27]

Vzorky byly odebrány z několika protlačených plechů, z těchto následně byla sestavena tabulka aritmetických průměrů tvrdostí. Dílčí výsledky naměřených tvrdostí jsou sestaveny ve výše zmíněné DP.[27]

Tab. 5.10 Hodnoty naměřených aritmetických průměrů (HV5) tvrdostí [27]

Průchod	Vzorek-1 \bar{x} [HV5]	Vzorek-2 \bar{x} [HV5]	Vzorek-3 \bar{x} [HV5]	$[\bar{x}]$ [HV5]	$\div HV5$
výchozí	107	97	93	99	99
2	131	125	127	127,66	127
4	140	149	157	148,66	148
6	153	132	157	147,33	147

Dále byly zjištěny hodnoty meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti u všech vzorků viz tab. 5.9.

Tab. 5.11 Mechanické vlastnosti mosazi Cu65Zn35(C2700) po protlačování [27]

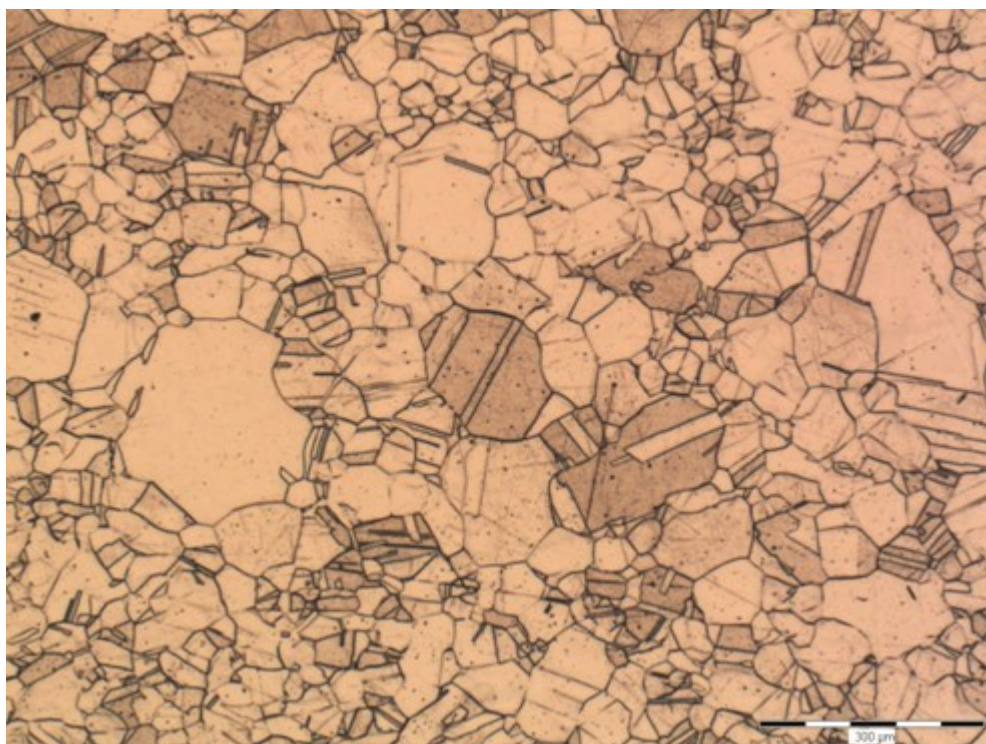
Počet průchodů	$R_{p0.2}$ [Mpa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
Výchozí	235	350	46
2x	305	390	23
4x	375	450	15
6x	355	430	14

Z výsledků mechanických zkoušek je patrné, že největší hodnoty jsou dosahovány po 4. průchodu, zároveň ale dochází ke snížení tažnosti o cca 30%. V dalších průchodech se již mechanické vlastnosti nezvyšují nebo v některých případech klesají. Jako optimální počet průchodů se tedy u experimentální části jeví 4. průchody.

Metalografická analýza

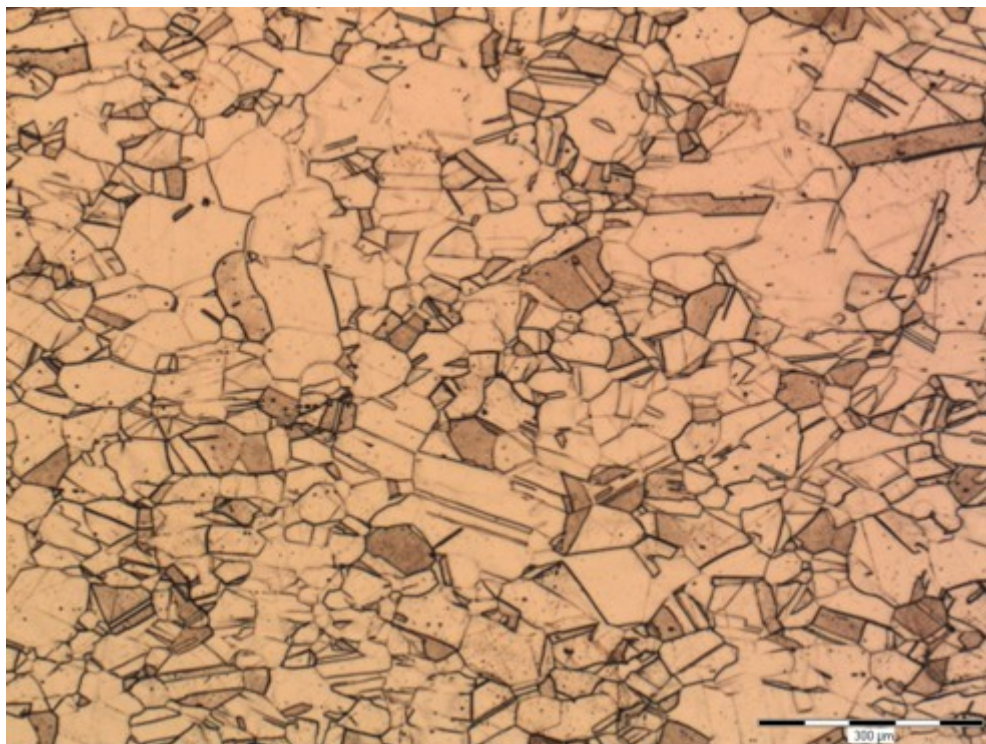
Všechny vzorky byly vyhodnoceny ve spolupráci s fakultou metalurgie a materiálového inženýrství na optickém mikroskopu NEOPHOT 2, vzorky byly leptány elektrolyticky. Byl zkoumán vliv počtů průchodů na velikost zrna a změnu struktury. Struktury byly vyhodnocovány vždy z příčné a podélné části vzorku. V této části budou prezentovány struktury mosazi před protlačováním a po čtvrtém průchodu zařízením.

Číslo velikosti zrna $G=5$, průměrná délka zachyceného úseku $l=0,057\text{ mm}$



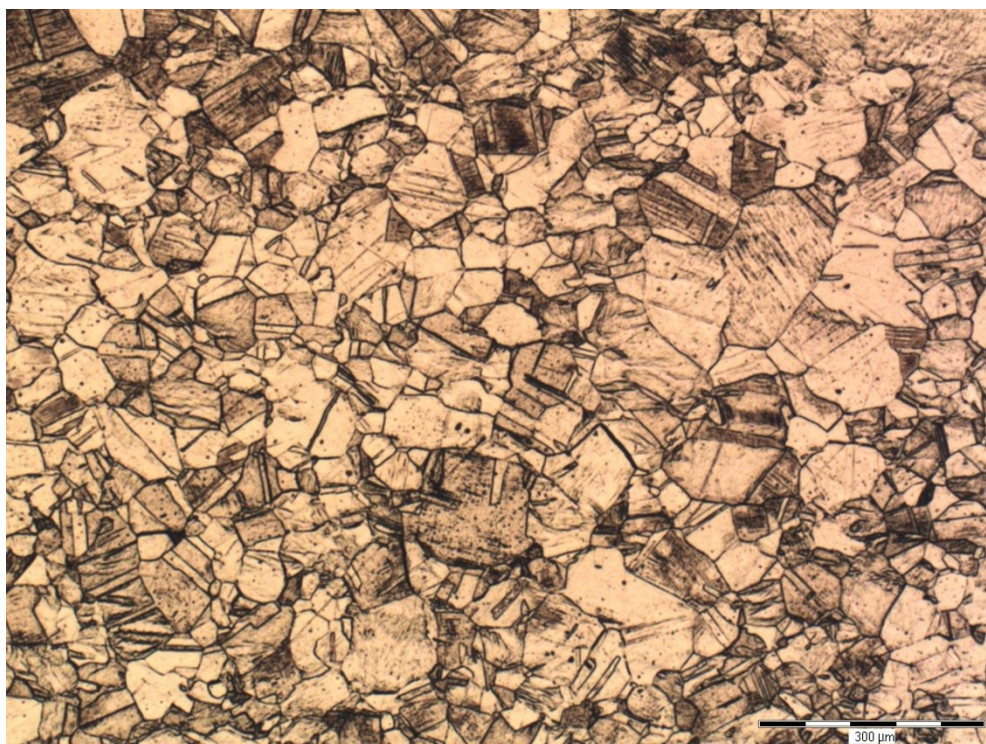
Obr. 27 Výchozí struktura - příčný vzorek (100x)

Číslo velikosti zrna $G=5$, průměrná délka zachyceného úseku $l=0,057\text{ mm}$



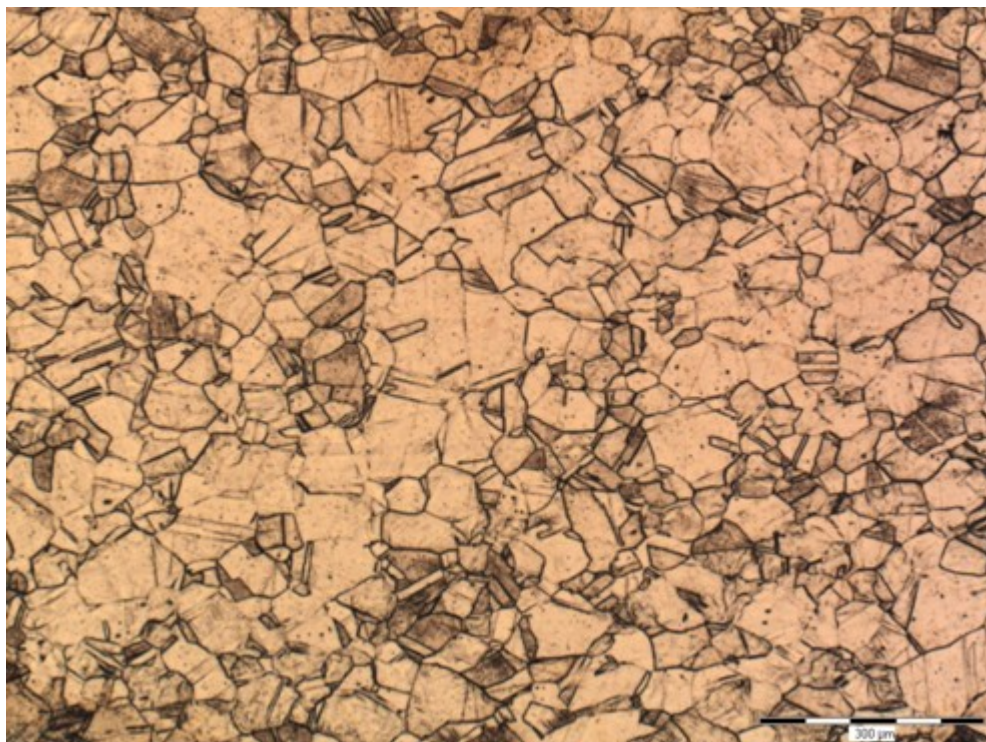
Obr. 28 Výchozí struktura – podélný vzorek (100x)

Číslo velikosti zrna $G=5$, průměrná délka zachyceného úseku $l=0,0586$ mm



Obr. 29 Po čtvrtém průchodu – příčný vzorek (100x)

Číslo velikosti zrna $G=5$, průměrná délka zachyceného úseku $l=0,052$ mm



Obr. 30 Po čtvrtém průchodu – podélný vzorek (100x)

Při srovnání počáteční struktury mosazi s analýzou po 4. průchodu nástrojem DRECE nebylo potvrzeno výrazné zjemnění zrna. Struktura se relativně nemění, pás plechu není homogenní, pouze je zde vidět vyšší hustota dislokací. Dochází k dislokačnímu zpevnění materiálu. Z tohoto důvodu je navržena úprava tvářecího nástroje pro dosažení vyšší intenzity deformace v deformační zóně, jakožto hlavního předpokladu dosažení rozdrobení zrna.

5.2 Výsledky matematických simulací

Daný typ simulace je přizpůsoben procesu ECAP a nahrazuje v dílčí míře proces DRECE. Proces DRECE, z hlediska složitosti jeho namodelování jak už bylo dříve uvedeno, vyžaduje vysokou časovou náročnost výpočtu. Zároveň dochází k častému přerušení výpočtu a výskytu chyb (Tab. 5.12).

Tab. 5.12 Shrnutí výsledků simulace nahrazující proces DRECE

Počet průchodů n	Intenzita deformace ε_i [-]	Intenzita napětí σ_i [MPa]
1.	0,667	544
2.	1,481	830
3.	2,378	916
4.	2,293	925

Výsledky získané matematickou simulací prvního průchodu na zařízení DRECE, hodnoty byli v předchozí kapitole prezentovány. Zde tabulka pro srovnání.

Tab. 5.13 Shrnutí dosažených výsledků simulace procesu DRECE po 1. Průchodu

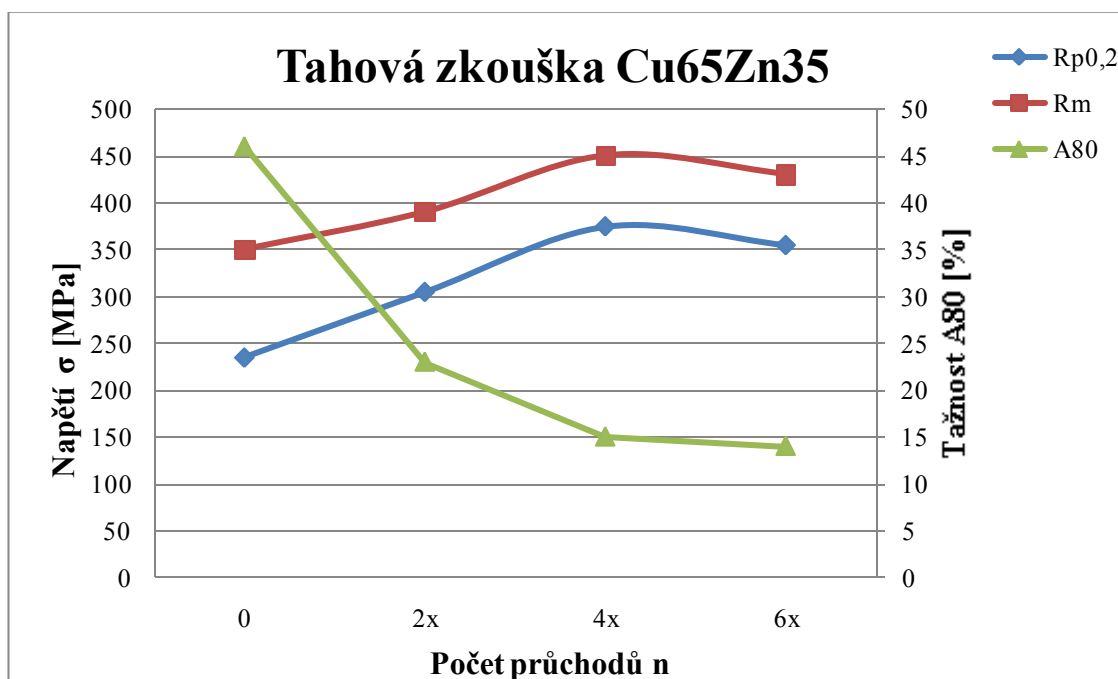
Průchod	Intenzita deformace ε_i [-]	Intenzita napětí σ_i [MPa]
1.	0,667	367

5.3 Vyhodnocení dosažených výsledků

Výsledky získané při řešení bakalářské práce slouží pro ověření deformačních stavů u nově definovaného nástroje DRECE. Z dosažených výsledků je patrné, že optimální počet průchodů pro zvýšení mechanických vlastností u mosazi se jeví 4. Dále již mechanické vlastnosti klesají, to je způsobeno vyčerpáním zásoby plasticity materiálu. Parametry meze pevnosti a smluvní meze kluzu stoupají na úkor tažnosti.

Tab. 5.14 Mechanické vlastnosti mosazi Cu65Zn35(C2700) po protlačování [27]

Počet průchodů	$R_{p0.2}$ [Mpa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
Výchozí	235	350	46
2x	305	390	23
4x	375	450	15
6x	355	430	14



Obr. 31 Vyhodnocení tahové zkoušky mosazi Cu65Zn35 (C2700)

U matematické simulace nahrazující proces DRECE je patrné zvýšení intenzity deformace (ε_i) a intenzity napětí (σ_i) po každém průchodu. Po čtvrtém průchodu dosahují hodnoty $\varepsilon_i=2,293$, což je oblast malých a středních deformací. Tomuto poznatku odpovídá i simulace procesu DRECE, kde po prvním průchodu dosahujeme obdobných hodnot jako u procesu, který tento proces nahrazuje. Lze tedy usoudit, že po provedení více průchodů bychom dosahovali taktéž srovnatelných výsledků.

Při srovnání matematických simulací s experimenty po 4. průchodu je vidět, že intenzita napětí u simulace se pohybuje v hodnotách 900 MPa, což při pohledu na tabulku (5.14) a graf (obr. 31) ukazuje hodnoty největšího zpevnění mosazi. Obdobný závěr lze vyvodit i z výsledků metalografické analýzy. Pomocí světelného mikroskopu je na struktuře po průchodech vidět zhuštění dislokací, což má za následek zvýšení mechanických vlastností mosazi. Matematická simulace po 4. průchodech také prokázala, že intenzita deformace nedosahuje hodnoty potřebné pro tvorbu UFG struktury, ale z hlediska zpevnění materiálu, dle výsledků mechanických zkoušek, jsou hodnoty odpovídající.

6. Závěr

V bakalářské práci jsem se zabýval matematickou simulací a vyhodnocením experimentálních výsledků z prototypového zařízení DRECE se zaměřením na mosaz. Matematickou simulací jsem ověřoval úhly kanálu a v nich vznikající deformace.

Dosažené výsledky experimentálních protlačování po vyhodnocení ukazují, že mosaz Cu65Zn35 se pouze deformačně zpevňuje, tento jev probíhá do doby než je po 4. a více průchodech vyčerpaná zásoba plasticity a dojde k podstatnému snížení tvářitelnosti mosazi. Dochází ke zvýšení meze pevnosti a meze kluzu a tomu odpovídajícímu poklesu tažnosti. Hodnoty tvrdosti stoupají pouze do 4. průchodu. Získané metalografické struktury potvrzují, že u mosazi nedošlo ani po 4. průchodech ke zjemnění zrna, pouze se zvýšila hustota dislokací, převážně dvojčatěním.

Pro dosažení UFG struktury je nutno dosáhnout extrémní plastické deformace $\varepsilon > 6$. [29] Tato hodnota by však musela být dosažena při co možná nejmenším počtu průchodů z hlediska efektivity daného tvářecího procesu. Vyšší počet průchodů ($\varepsilon > 6$ natolik vyčerpá plasticitu, že materiál již není schopen podrobit se plastické deformaci a v některých případech dokonce ztrácí soudržnost. Byla provedena změna geometrie nástroje DRECE a vyroben nový nástroj, který bude v dalších pracích ověřován právě z hlediska dosažení vyšší efektivity procesu DRECE. Vlastní simulace napodobujícího procesu DRECE byla provedena pro 4 průchody, právě kvůli jeho složitosti. Z dosažených hodnot matematických simulací je po více průchodech zřejmé zvýšení intenzity deformace, ale zároveň dochází i ke zvýšení intenzity napětí.

Jedním z výstupů již uskutečněných experimentů bylo ověření vlivu tepelného zpracování na velikost mechanických vlastností. Experimenty bylo prokázáno, že nedochází k výrazným změnám těchto vlastností. Jednou z možností se jeví volba jiného typu mosazi s odlišným chemickým složením (jednoznačný výskyt α a β fáze). Vyšší obsah zinku by zajistil zvýšení pevnosti a tažnosti, železo by zajistilo zjemnění zrna při rekrytalizaci.

Dalším řešením je změna geometrie tvářecího nástroje (úhlů ψ ϕ a poloměrů R_1 , R_2). Podávání materiálu do nástroje DRECE je zajištěno třením mezi válci a materiálem. Teprve v pásmu deformace dochází k intenzivnímu mazání z hlediska optimalizace celého procesu a tímto jen k minimálnímu tření mezi materiálem a nástrojem. Z tohoto hlediska efektivita tvářecího procesu může být zvýšená dosažením vyššího koeficientu tření mezi

povrchem podávacího válce materiálem Další možností je ověření vlivu změny rychlosti protlačování.

Údaje obsažené v bakalářské práci potvrzují, že dochází ke zpevnění materiálu na úkor tažnosti. Při optimální volbě vhodného materiálu s chemickým složením, požadovaném zjemnění zrna, může být dosaženo podstatného zvýšení mechanických vlastností a zachování plastických vlastností. Dané předpoklady byly prokázány matematickou simulací procesu DRECE. Zkušenosti ze simulací budou využity v dalších částech výzkumných prací u jiných typů materiálů pro ověřování vlivu zjemňování zrna na dosažené mechanické vlastnosti.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Stanislavu Ruzzovi, CSc., odborným konzultantům Doc. RNDr. Lubomíru Čížkovi CSc., doc. Ing. Tiboru Doničovi, CSc. a Ing. Janu Kedroňovi, z VŠB-TU Ostrava za pomoc při provádění simulací. Poděkování patří také mým rodičům, za značnou podporu při celém studiu.

Seznam použité literatury

- [1] KOPŘIVA, M. *Počítačová podpora technologie*, Brno, 2002, Fakulta strojního inženýrství VUT Brno, Odbor tváření kovů a plastů, str. 13-16.
- [2] PETRUŽELKA, J.; HRUBÝ, J. *Výpočetní metody ve tváření*. 1. vyd., Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2000, Str. 131 – 135.
- [3] FormFEM 2.1: *Program pro simulaci tváření rovinných a rotačně symetrických těles – uživatelská příručka*, ITA s.r.o., březen 2008.
- [4] QForm: *Nejjednodušší simulační systém*. Krok za krokem, Verze 2.1, *Quantor Ltd*.
- [5] QUANTOR LTD. *QForm3D software [online], Overview*, Dostupné z: <<http://www.qform3d.com>>
- [6] *Simufact Forming* [online]. 2011 [cit. 2011-11-28]. Simufact. Dostupné z: <http://www.simufact.de/en/solutions/sol_form.html>.
- [7] *EC Engineering* [online]. 2011 [cit. 2011-11-28]. Simufact. Dostupné z: <<http://www.ec-e.cz/cz/simufact/>>.
- [8] *Qform3d* [online]. 2011 [cit. 2011-11-29]. QuantorForm. Dostupné z: <<http://www.qform3d.com>>
- [9] *Ita-tech* [online]. 2011 [cit. 2011-11-29]. ITA technology & software. Dostupné z: <www.ita-tech.cz>.
- [10] *DEFORM* [online]. 2011 [cit. 2011-11-29]. Scientific Forming Technologies Corporation. Dostupné z: <<http://www.deform.com/products/deform-3d/>>.
- [11] *PAM-STAMP* [online]. 2011 [cit. 2011-11-29]. ESI group s.r.o. Dostupné z: <<http://www.esi-group.com/products/metal-forming/pam-stamp-2g>>.
- [12] *MM Průmyslové spektrum: Strojírenský měsíčník* [online]. 2011 [cit. 2001-07-11]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-tvareni-plechu.html>>.

- [13] RUSZ, S.; *MODERNÍ METODY VE TVÁŘENÍ*. VŠB-TU Ostrava: FS, 2009. Sylaby, s. 12-13.
- [14] PENGUYUE, W.; YUCAI, W.; SHUISHENG, X.; GUOIJIE, H. Numerical Simulation on Conform Process of Aluminium Alloy Rectangular Hollow Conductor, *Materials Science Forum*, Vol. 546-549 (2006), p. 735-740.
- [15] RUSZ, S.; MALANÍK, K.; KEDROŇ, J.; SKOTNICOVÁ, I. Nové poznatky z vývoje a zkušebního provozu prototypového zařízení DRECE: *sborník příspěvků mezinárodní konference NANOCON*, Rožnov pod Radhoštěm 20. - 22. října 2009
- [16] STEIDL, J. *Matematická simulace procesu vícenásobné plastické deformace: diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2010, 70 s. Vedoucí práce: Rusz, S.
- [17] ETHERINGTON, C. CONFORM- A new koncept for the continuous extrusion forming of metal, *ASME Trans. Of96B(3)* (1974) J.Eng. Ind. 893-900
- [18] KIM, Y. H.; CHO, J. R.; JEONG, H. S.; KIM, K. S.; YOON, S. S.; *A study on optimal design for CONFORM process* [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/>>
- [19] CHO, J. R.; JEONG, H. S.; *CONFORM process: surface separation, curling and process characteristics to the wheel diameter* [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/>>

- [20] VALIEV, R. Z.; LANGDON, T. G.; Some new trends in SPD processing for fabrication of bulk nanostructured materials. *Materials Science Forum*, Nanomaterials by severe plastic deformation, Vol. 503-504 (2006), Trans Tech Publications, pp. 3-10.

- [21] SHUBO, X.; GUOQUN, Z.; XUFANG, R.; YANJIN, G. Numerical investigation of aluminum deformation behavior in three-dimensional continuous confined strip shearing process, *Materials Science and Engineering A*, 476 (2008), p. 281-289.

- [22] RUSZ, S.; MALANÍK, K. Průběžná zpráva projektu MPO č. 2A-1TP1/124 – *Trvalá prosperita – Výzkum vlivu extrémních podmínek deformace na sub mikrostrukturu kovu a zkušebních metod pro diagnostiku jejich technologických vlastností*, září, 2009, pp. 1-15

- [23] *Cadex99* [online]. [cit. 2012-03-08]. Dostupné z: <http://www.cadex99.com/CAE.htm/>

- [24] BWE Ltd. [online]. [cit. 2012-03-08]. Dostupné z: <http://www.bwe.co.uk/webpages/conform.htm>

- [25] JAE-CHUL LEEA; HYUN-KWANG SEOKA; JUN-HYUN HANA; YOUNG-HOON CHUNGA. *Controlling the textures of the metal strips via the continuous confined strip shearing (C2S2) process*. [online]. [cit. 2012-03-08]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/>

- [26] *Lexikon technických materiálů 3.0* [počítačový program], srpen 2003

- [27] JANČA, M. *Zjemňování struktury v pásu plechu na zařízení DRECE: diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2011, 74 s. Vedoucí práce: Rusz, S.
- [28] PENG-YUE, W.; SHUI-SHENG, X.; HUA-QIN, H.; *Effect of extrusion wheel angular velocity on continuous extrusion forming process of copper concave bus bar* [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/>>
- [29] ZRNIK, J.; KRAUS, L.; PRNKA, T.; ŠPERLIK, K. *Příprava ultrajemnozrnných a nanokrystalických kovových materiálů extrémní plastickou deformací a jejich vlastnosti*. COMTES F. H. T. 2007.
- [30] VALIEV, R. Z.; T. G. LANGDON. *Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement* [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [31] HRUBÝ, J; RUSZ, S; ČADA, R. *Strojírenské tváření*. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006, s. 11. ISBN 80-248-1218-5.